This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.

+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.

+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.

+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.

LANE MEDICAL LIBRARY STANFORD
2 45 0175 0221
QP
310
W3F5
1900
LANE
STORAGE

611.97
F529

To avoid fine, this book should be retu
or before the date last stamped bel

DER

GANG DES MENSCHEN.

III. THEIL:

BETRACHTUNGEN ÜBER DIE WEITEREN ZIELE DER UNTERSUCHUNG UND ÜBERBLICK ÜBER DIE BEWEGUNGEN DER UNTEREN EXTREMITÄTEN.

VON

OTTO FISCHER,

AUSSERORDENTLICHEM MITGLIEDE DER KÖNIGLICH SÄCHSISCHEN GESELLSCHAFT DER WISSENSCHAFTEN.

Des XXVI. Bandes der Abhandlungen der mathematisch-physischen Classe der Königl. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften

N° III.

MIT 7 TAFELN UND 3 TEXTFIGUREN.

LEIPZIG

BEI B. G. TEUBNER

1900.

LIBRARY

Vorgetragen für die Abhandlungen am 23. April 1900.
Das Manuscript eingeliefert am 23. April 1900.
Den letzten Bogen druckfertig erklärt am 13. Juni 1900.

STANFORD LIBRARY

DER

GANG DES MENSCHEN.

III. THEIL:

BETRACHTUNGEN ÜBER DIE WEITEREN ZIELE DER UNTERSUCHUNG UND ÜBERBLICK ÜBER DIE BEWEGUNGEN DER UNTEREN EXTREMITÄTEN

VON

OTTO FISCHER,

AUSSERORDENTLICHEM MITGLIEDE DER KÖNIGLICH SÄCHSISCHEN GESELLSCHAFT DER WISSENSCHAFTEN.

Inhaltsverzeichniss.

Betrachtungen über den weiteren Gang und die Endziele der Untersuchung 87
Das Verhalten der Beine im Allgemeinen 116
Kritik der Beschreibung der Beinbewegungen, welche die Brüder Weber in ihrer Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge gegeben haben 138
Ableitung der Winkelcoordinaten für die Abschnitte der unteren Extremitäten 145
Ableitung der Winkel des Kniegelenks und I. Fussgelenks 164
Rückblick 168

Betrachtungen über den weiteren Gang und die Endziele der Untersuchung.

In dem vorangehenden II. Theil der Untersuchung über den Gang des Menschen[1]) ist die Bewegung des Gesammtschwerpunktes des menschlichen Körpers beim Gehen festgestellt und analysirt worden. Abgesehen davon, dass hierdurch ein klarer Einblick in die Bewegung des Körpers als Ganzes gewonnen worden ist, haben sich auf Grund dieser Kenntniss die äusseren Kräfte bestimmen lassen, welche in den einzelnen Phasen des Bewegungsvorganges auf den ganzen menschlichen Körper einwirken. Diese äusseren Kräfte sind theils unserem Willen nicht unterworfen, wie die Schwere, theils sind es solche, die wir innerhalb gewisser Grenzen willkürlich in ihrer Grösse verändern können. Zu der letzten Art gehören vor allen Dingen der Gegendruck und der Reibungswiderstand des Bodens. Der Luftwiderstand kann genau genommen zu beiden Arten gerechnet werden; denn wir haben zwar keinen Einfluss auf die Luftströmungen ausser uns, sind aber andererseits im Stande, die Geschwindigkeit der Fortbewegung, welche in erster Linie für die Grösse des Luftwiderstandes bestimmend ist, in weiten Grenzen unserem Körper aufzuzwingen.

Die Möglichkeit, Gegendruck und Reibungswiderstand des Bodens nach unserem Willen zu gestalten, ist dadurch gegeben, dass dieselben von dem Druck abhängen, den wir in den einzelnen Phasen des Bewegungsvorganges gegen den Boden ausüben. Wie schon früher auseinandergesetzt wurde, ist der Gegendruck der zur Bodenfläche normalen, und der Reibungswiderstand, oder kurz die Reibungskraft, der in die Bodenfläche hineinfallenden Componente des Druckes entgegengesetzt gleich. Dieser Druck wird nun aber bedingt durch den Bewegungszustand des Körpers, welcher

1) Abhandlungen der Königl. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften, mathem.-phys. Classe, Band XXV No. I.

in letzter Linie eine Function der Spannungsänderungen unserer Muskeln ist.

Die Spannungen der betheiligten Muskeln brauchen nicht nothwendig active, durch Innervation hervorgerufene, zu sein, da ja jeder über seine natürliche Länge ausgedehnte Muskel immer einen gewissen Grad von rein elastischer Spannung besitzt, der um so grösser ist, je mehr sich der Muskel dem Zustand maximaler Verlängerung nähert. Wenn man nun auch vom physiologischen Standpunkte aus wohl zu unterscheiden hat, ob die Spannungsänderung eines Muskels eine Folge der Innervation ist, oder ob sie von der passiven Verlängerung oder Verkürzung des Muskels herrührt, so ist der Einfluss auf den Bewegungszustand des Körpers unter sonst gleichen Umständen doch in beiden Fällen genau derselbe. Jede Spannungsänderung eines Muskels wirkt, ebenso wie auch die Aenderung der Spannung eines Gelenkbandes, wie ein Paar entgegengesetzt gleicher, an verschiedenen Abschnitten des Körpers angreifender Kräfte. Dieselben stellen für den gesammten Körper ein Paar innerer Kräfte dar und sind daher nicht im Stande, unmittelbar die Bewegung des Gesammtschwerpunktes zu beeinflussen; sie vermögen dies beim Gehen erst durch Vermittelung des Fussbodens, indem sie eben eine Aenderung des Druckes hervorbringen, welchen wir mit unseren Füssen gegen den Boden ausüben.

Die Druckänderung kommt dadurch zu Stande, dass die beiden entgegengesetzt gleichen Muskelkräfte für die zwischen ihren Insertionsstellen liegenden Körpertheile äussere Kräfte darstellen und dieselben daher im Allgemeinen in Bewegung setzen. Sie suchen insbesondere jeden der beiden Körpertheile, an denen sie angreifen, zu drehen, indem sie mit Kräftepaaren (im POINSOT'schen Sinne) auf ihn einwirken, deren eine Kraft die direct an ihm angreifende ist, während die andere, der ersten entgegengesetzt gleiche, an dem Mittelpunkt desjenigen Gelenkes ihren Angriffspunkt nimmt, welches den betreffenden Körpertheil mit dem den anderen Insertionspunkt des Muskels tragenden unmittelbar oder mittelbar verbindet. Es übt nämlich die nicht an dem Körpertheil selbst angreifende Kraft einen Druck auf den Mittelpunkt des Verbindungsgelenkes aus, welcher gerade so gross ist, als ob die Kraft in gleicher Stärke und Richtung direct an ihm angriffe.

Dabei ist wohl im Auge zu behalten, dass die Angriffspunkte

der beiden Muskelkräfte nur dann mit den Insertionspunkten, bezüglich gewissen mittleren Punkten der Insertionsflächen des Muskels identisch sind, wenn der Muskel sich frei zwischen seinen Insertionsstellen auszuspannen vermag, und nicht, wie es meistens der Fall ist, durch Knochenvorsprünge, Bandschlingen, Sehnenscheiden u. s. w. aus seinem geradlinigen Verlauf abgelenkt wird. Im letzteren Falle hat man dann stets diejenigen Stellen der Knochenvorsprünge u. s. w. als Angriffspunkte der beiden Muskelkräfte aufzufassen, zwischen denen der Muskel sich thatsächlich ungehindert von dem einen der beiden Körpertheile zu dem anderen ausspannt. Es ist dabei ganz gleichgültig, ob dieses Stück des Muskels gross oder klein ist, ob auf demselben alle Muskelfasern anzutreffen sind oder nicht. Selbst, wenn die Strecke gar keine Muskelfasern enthält, sondern nur einen Theil der Endsehne des Muskels darstellt, wie es bei den meisten über das Handgelenk und das Fussgelenk und den über die Finger- und Zehengelenke hinwegziehenden Muskeln beispielsweise der Fall ist, werden sowohl die Angriffspunkte als auch die Richtungen der beiden Muskelkräfte ausschliesslich durch das sich zwischen den beiden Körpertheilen ungehindert ausspannende Stück des Sehnenstranges bestimmt. In diesen Fällen ist gewissermaassen die Kraftmaschine von der Stelle entfernt, an welcher die Arbeit verrichtet wird, und die Kraft durch Transmission dahin übertragen, wie es so vielfach im Maschinenbetriebe vorkommt.

Handelt es sich um einen mehrgelenkigen Muskel, so üben die beiden Muskelkräfte auch im Allgemeinen ein Drehungsmoment auf die Körperteile aus, an denen der Muskel zwar nicht direct inserirt, welche aber doch zwischen den beiden Insertionsstellen im Körper eingeschaltet sind. Das wirksame Kräftepaar kommt in diesen Fällen dadurch zu Stande, dass jede der beiden entgegengesetzt gleichen Muskelkräfte auf den innerhalb des Körpers ihrem Angriffspunkte zunächst liegenden Gelenkmittelpunkt des betreffenden Körpertheils gerade so einwirkt, als ob sie in gleicher Richtung und Stärke an diesem Punkte direct angriffe. Ist der Muskel mehrfach durch anatomische Einrichtungen von dem geraden Verlaufe zwischen seinen Insertionsstellen abgelenkt, wie es zum Beispiel bei den langen Fingerbeugern und Fingerstreckern der Fall ist, so wird er sich gewöhnlich über die verschiedenen Gelenke mit verschiedener Richtung ausspannen. Dann wirkt er

gerade so wie eine Kette von aneinander gereihten Muskeln, welche zwar verschiedene Richtungen des resultirenden Muskelzuges, aber genau gleiche Spannung besitzen.

Man hat also das Resultat, dass die Muskeln infolge ihrer activ oder passiv erzeugten Spannung im Allgemeinen alle zwischen ihren Insertionsstellen liegenden Körpertheile durch Kräftepaare in Drehung zu versetzen streben.

Es lässt sich nun auch für die äusseren Kräfte, also für die Schwere und die als äussere Kräfte aufzufassenden Reactionskräfte, wie Gegendruck des Bodens und Reibungskraft, nachweisen, dass sie in allen Fällen, in denen sie einen Körpertheil zu drehen suchen, sich in irgend einer Weise zu Kräftepaaren im POINSOT'schen Sinne vereinigen, mit welchen sie auf denselben einwirken, was später noch ausführlich an bestimmten Beispielen erläutert werden soll.

Unter dem Einfluss der Kräftepaare, mit denen die inneren und äusseren Kräfte des menschlichen Körpers auf die einzelnen Körpertheile einwirken, werden sich nun die letzteren im Allgemeinen in Drehung setzen. Nur wenn alle an je einem Körpertheil angreifenden Kräftepaare sich das Gleichgewicht halten, tritt keine Drehung irgend eines Körpertheils ein. Es befindet sich dann aber der ganze Körper überhaupt in Ruhe, wenn er nur an irgend einer Stelle mit dem Fussboden oder sonst einem festen Hinderniss in Berührung ist und nicht gerade, wie beim Sprung, zeitweilig frei in der Luft schwebt. Denn wenn die Glieder keine Drehung ausführen können, so bleibt dem ganzen Körper nur noch die Möglichkeit einer translatorischen Bewegung in toto, bei der alle Punkte gleiche Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit besitzen; diese ist aber unmöglich, sobald auch nur ein Punkt des Körpers, z. B. irgend eine Stelle des Fusses, mit dem Boden in Berührung ist und infolgedessen nicht an der Bewegung theilnehmen kann.

Nimmt man nun an, dass von einer Ruhehaltung des Körpers aus ein bestimmter Muskel durch veränderte Innervation seine Spannung vergrössert, so wachsen infolgedessen die Momente aller Kräftepaare, mit denen derselbe auf die zwischen seinen Insertionspunkten befindlichen Körpertheile wirkt oder, mit anderen Worten, es kommen zu den schon vorhandenen Kräftepaaren noch neue hinzu, welche der Spannungsänderung des Muskels entsprechen.

Es kann dann nicht mehr Gleichgewicht zwischen den diese Körpertheile beeinflussenden Kräftepaaren bestehen, und es tritt Bewegung ein.

Die Art und der gesetzmässige Verlauf dieser Bewegung werden jedoch nicht allein von den Momenten der neu hinzutretenden Kräftepaare bestimmt, sondern sie hängen auch z. B. von der Grösse und Vertheilung der Masse innerhalb der Körpertheile, also von der Lage ihrer Schwerpunkte und der Grösse ihrer Trägheitsmomente ab; sie werden aber vor allen Dingen von der Lage eines jeden Körpertheils innerhalb des Gesammtkörpers und insbesondere von der Art der Gelenkverbindung mit den übrigen Abschnitten des Körpers beeinflusst. Endlich wird die Bewegung auch dadurch modificirt, dass als Folge der Gelenkbewegung andere Muskeln in ihrer Lage zu den Gelenken etwas geändert, dass sie gleichzeitig passiv gedehnt oder verkürzt und dadurch in ihrer elastischen Spannung beeinflusst werden, und dass neben der Aenderung der Stellung der einzelnen Körpertheile im Raume im Allgemeinen eine Aenderung der von den äusseren Kräften verursachten Kräftepaare einhergeht.

Wie dem auch sei, jedenfalls wird in der Regel die Bewegung sich nicht auf die Körpertheile beschränken können, welche zwischen den Insertionsstellen des vermehrt innervirten Muskels liegen, und welche primär eine Aenderung ihrer Kräftepaare erfahren, sondern es werden auch die übrigen Abschnitte des menschlichen Körpers in die Bewegung hineingezogen. Dieser Satz gilt ganz allgemein und ganz unabhängig davon, ob die Contraction des Muskels merkliche Aenderung in den Kräftepaaren der übrigen Muskeln und der äusseren Kräfte nach sich zieht oder nicht. Es handelt sich dabei nicht, wie man vielleicht denken könnte, bloss um Parallelverschiebung der benachbarten Körpertheile, sondern im Allgemeinen auch um Drehung derselben. Es übt nämlich ein Körpertheil bei seiner Bewegung mit jedem Ende, an welchem ein anderer Körpertheil eingelenkt ist, auf den letzteren einen Druck aus, sobald das betreffende Gelenkende an der Bewegung Theil nimmt. Dieser Druck wirkt aber auf den benachbarten Körperabschnitt genau so wie eine äussere Kraft, welche gewöhnlich den Körper auch in Drehung zu versetzen sucht.

Man sieht also, dass ein Muskel durchaus nicht nur auf die Körpertheile und Gelenke einwirkt, über welche er hinwegzieht,

sondern dass er bei seiner Contraction im Allgemeinen auch solche in Bewegung setzt, welche scheinbar ganz ausserhalb seines Wirkungsbereiches liegen, eine Thatsache, die ich schon früher[1]) abgeleitet, begründet und an speciellen Beispielen erläutert habe.

Werden mehrere Muskeln gleichzeitig aus einer Ruhehaltung des Körpers willkürlich in ihrer Spannung geändert, oder sind allgemein beliebig viele Muskeln in der Weise innervirt, dass sich die Kräftepaare, mit denen die sämmtlichen inneren, activen und passiven, und die äusseren Kräfte auf jeden einzelnen Körpertheil einwirken, nicht gerade das Gleichgewicht halten, so ist die Drehung der einzelnen Körpertheile genau so, als ob auf jeden nur ein einziges Kräftepaar einwirkte, welches gleich dem resultirenden aller an ihm angreifenden Paare ist.

Nach dem Gesagten ist es leicht verständlich, in welcher Weise wir den Druck unserer Füsse gegen den Boden, und dadurch den Gegendruck und den Reibungswiderstand des letzteren, zu ändern vermögen. Wir brauchen nur durch geeignete Muskelaction unseren Füssen in einer bestimmten Richtung eine Bewegung aufzwingen zu wollen. Diese Bewegung wird, so lange die intendirte Beschleunigung der Füsse eine gewisse Grenze nicht übersteigt, entweder durch den Gegendruck und Reibungswiderstand des Bodens oder durch die Schwere und den Reibungswiderstand des Bodens gehindert, je nachdem die den Füssen mitgetheilte Beschleunigung gegen den Boden hin oder von demselben fort gerichtet ist. Der Effect der Muskelaction wird daher zunächst in einer Aenderung des gegen den Boden ausgeübten Druckes bestehen, welche ihrerseits eine entsprechende Aenderung des Gegendruckes und der Reibungskraft, und demnach eine Bewegung bezüglich Beschleunigungsänderung des Gesammtschwerpunktes zur Folge hat.

Während der Druck, welchen wir beim Gehen in jedem Moment mit unseren Füssen gegen den Boden ausüben, und der gewissermaassen den nach Aussen hin wahrnehmbaren Endeffect unserer Muskelanstrengung für die Locomotion darstellt, durch den im Laufe der Bewegung sich fortwährend ändernden Spannungszustand der Muskeln eindeutig bestimmt ist, lässt sich umgekehrt

1) Vgl. Beiträge zu einer Muskeldynamik. Erste Abhandlung: Ueber die Wirkungsweise eingelenkiger Muskeln. Abhandl. d. Kgl. Sächs. Ges. d. Wiss., math.-phys. Classe, Bd. XXII No. II.

aus der Kenntniss dieses Druckes allein natürlich noch kein Schluss auf die Thätigkeit der verschiedenen Muskeln beim Gehakt ziehen. Denn wir können auf unzählig viele Arten durch Contraction einzelner Muskeln oder durch combinirte Thätigkeit verschiedener Muskelgruppen den gleichen Druck gegen den Fussboden hervorrufen. Man kann der Lösung dieser Aufgabe erst näher treten, wenn man auch über die Bewegungen genau orientirt ist, welche die Muskeln während des Gehens den einzelnen Körperabschnitten ertheilen, d. h. also wenn man sich eine eingehende Kenntniss des ganzen Bewegungsvorganges verschafft hat. Es genügt dabei keineswegs, nur die aufeinanderfolgenden Stellungen des Körpers und die Bewegung des Gesammtschwerpunktes zu kennen, sondern man muss ausserdem genau wissen, welche Winkelgeschwindigkeiten und Winkelbeschleunigungen die einzelnen Körperabschnitte in den successiven Bewegungsphasen besitzen, welche Bewegungen die einzelnen Schwerpunkte ausführen u. s. w.

Zwischen den sämmtlichen das Bewegungsgesetz beim Gehen oder irgend einer anderen Bewegung des menschlichen Körpers charakterisirenden Grössen und den inneren und äusseren auf den Körper einwirkenden Kräften bestehen nun ganz bestimmte Beziehungen, welche in den Differentialgleichungen der Bewegung ihren Ausdruck finden. Diese Bewegungsgleichungen geben im Princip die Möglichkeit, aus dem Verlauf der Bewegung auf die Thätigkeit der Muskeln zu schliessen. Da jedoch die Drehungen der einzelnen Körpertheile nur von den resultirenden Kräftepaaren abhängen, zu denen sich alle an je einem Körpertheil angreifenden Kräftepaare zusammensetzen, so wird man mit Hülfe der Differentialgleichungen der Bewegung zunächst auch nur die Momente der resultirenden Kräftepaare für jeden einzelnen Körpertheil gewinnen können. Hat man dieses Ziel erreicht, so wird es dann Sache der weiteren Untersuchung sein müssen, die resultirenden Kräftepaare in ihre Componenten zu zerlegen, um dadurch die Spannungen der verschiedenen Muskeln und überhaupt die Rolle festzustellen, welche die einzelnen Muskeln beim Gehen spielen. Zu diesem Zwecke muss man sich natürlich erst genau darüber orientiren, mit welchen Drehungsmomenten die äusseren Kräfte und jeder Muskel bei beliebiger Spannung in den verschiedenen Haltungen, die der Körper beim Gehen successive einnimmt, auf die einzelnen Abschnitte des Körpers einwirken.

Damit ist in den gröbsten Zügen der Gang der Untersuchung angedeutet. Derselbe ist in Anbetracht der komplicirten mechanischen Verhältnisse, wie sie der in so zahlreiche Theile gegliederte menschliche Körper darbietet, zwar äusserst mühsam; es ist aber nach meiner Ueberzeugung der einzige Weg, der überhaupt zum Ziele führen kann. Ich glaube nicht, dass man ohne Berücksichtigung der Bewegungsgleichungen jemals zu vollkommen einwurfsfreien Resultaten über die Thätigkeit der Muskeln beim Gehen und anderen Bewegungen des menschlichen Körpers gelangen wird. Es liegt mir durchaus fern, den Werth der zahlreichen Versuche, mittelst lokaler Faradisation der Muskeln, oder durch Reizung bestimmter Partien der Grosshirnrinde, oder aber auf dem Wege der Beobachtung von Bewegungsanomalien bei pathologischen Fällen u. s. w. einen Einblick in die Wirkung der einzelnen Muskeln zu gewinnen, zu gering zu schätzen. Derartige Untersuchungen haben, ebenso wie manche theoretische Betrachtungen, in vielfacher Hinsicht Licht auf die Function der Muskeln unter bestimmten Verhältnissen geworfen. Man hat sich jedoch immer zu vergegenwärtigen, dass man in den meisten Fällen nur einen Specialfall herausgegriffen hat, und die an demselben gefundenen Resultate nicht ohne Weiteres auf einen anderen Fall übertragen darf. Denn da, wie weiter oben auseinandergesetzt worden ist, ein Muskel bei seiner Contraction im Allgemeinen nicht nur die Körpertheile in Bewegung setzt, denen er angehört, sondern seine Wirksamkeit weit über diesen engen Bereich hinaus erstreckt, so ist der Effect der Contraction, selbst wenn sie von einer Ruhehaltung des Körpers aus geschieht, wesentlich von der Stellung des Körpers, durch welche ja das mechanische Verhalten der Körpertheile gegenüber angreifenden Kräften mit bedingt wird, abhängig. Man kann daher, um nur ein Beispiel zur Erläuterung des Gesagten anzuführen, die Wirkung des M. gastrocnemius auf keinen Fall in der Weise erschöpfend feststellen, dass man den Muskel faradisirt, während das Bein am Rumpfe hängt. Denn, wenn sich der Muskel contrahirt, während der Fuss auf dem Boden aufsteht, so sieht er sich ganz anderen mechanischen Verhältnissen gegenübergestellt, und die Wirkung wird infolgedessen eine andere sein. Sie wird sich auch in diesem Falle verschieden gestalten, je nachdem der andere Fuss ebenfalls mit dem Boden in Berührung ist oder nicht; sie wird überhaupt genau genommen

bei jeder neuen Haltung des Körpers anders ausfallen. Die verschiedenen Fälle, welche bei einer vollständigen Untersuchung über die Function eines Muskels zu unterscheiden wären, sind so zahlreich, dass es unmöglich ist, sie auf empirischem Wege alle zu erledigen. Und doch wäre dies eine conditio sine qua non, wenn man die Resultate derartiger experimenteller Untersuchungen auf ausgedehnte Bewegungen des menschlichen Körpers, bei denen wie beim Gehen, die Gelenkstellungen sich stetig ändern, ausdehnen wollte.

Auch die klinische Beobachtung, die Untersuchung der Bewegungsstörungen infolge von Lähmung oder Atrophie einzelner Muskeln und ganzer Muskelgruppen ist nicht im Stande, vollkommenes Licht auf die Thätigkeit der Muskeln unter normalen Verhältnissen zu werfen. Man kann sich durch dieselbe wohl im Allgemeinen ein Urtheil über die Art der Bewegungen, welche ein Muskel verursacht, bilden, man erfährt aber dabei z. B. nichts von der Spannung, welche der Muskel besitzen muss, um in bestimmter Weise die Bewegung zu beeinflussen.

Selbst, wenn es gelingen sollte, von jeder Haltung des Körpers aus die Wirkung der einzelnen Muskeln empirisch festzustellen, so hätte man damit doch noch keine genügende Grundlage gewonnen für die Erforschung der Muskelthätigkeit bei der Locomotion und vielen anderen Bewegungen des menschlichen Körpers. Denn der Effect der Contraction eines Muskels hängt auch sehr wesentlich von dem jeweiligen Bewegungszustand der einzelnen Körpertheile ab; er ist ein anderer, wenn der Muskel sich während der Bewegung contrahirt, als wenn er dies von einer Ruhehaltung aus thut. Eine jede Bewegung eines Körpertheils hat gewöhnlich auch Bewegungen der übrigen zur Folge, wie schon oben angedeutet worden ist. Es ist unter Umständen möglich, dieselbe Bewegung in einem Gelenk, welche ein Muskel von der Ruhe aus hervorrufen würde, allein dadurch zu erzielen, dass man auf einen entfernteren Körpertheil in bestimmter Weise etwa durch äussere Kräfte bewegend einwirkt. Man würde daher einen groben Fehler begehen, wollte man im letzteren Falle den Schluss ziehen, dass ein bestimmter Muskel die Gelenkbewegung hervorgebracht hat, von dem man weiss, dass ihm bei seiner Contraction von der Ruhe aus diese Wirkung zukommt.

Es ist also unbedingt nothwendig, dass man vor allen Dingen einen klaren Einblick in den ganzen Bewegungsvorgang hat, dass

man genau davon unterrichtet ist, wie die einzelnen Abschnitte des menschlichen Körpers sich gegenseitig in ihren Bewegungen beeinflussen, in welcher Weise die Wirkung eines Muskels durch die jeweilige Haltung und die schon vorhandene Bewegung des ganzen Körpers und durch die gleichzeitige Thätigkeit anderer Muskeln oder das Vorhandensein äusserer Kräfte modificirt wird, wenn man hoffen will, in einwurfsfreier Weise die Rolle aufzudecken, welche den einzelnen Muskeln oder auch nur den grösseren Muskelgruppen bei der Erzeugung ausgedehnter Bewegungen des ganzen Körpers zufällt.

Diese Kenntniss kann nur mit Hülfe der Differentialgleichungen der Bewegungen oder, wie man sie auch kurz nennt, der Bewegungsgleichungen vermittelt werden. Denn diese sind eben der vollkommene Ausdruck für die Beziehungen zwischen dem Bewegungszustand des ganzen Körpers, also den successiven Haltungen der einzelnen Glieder, den Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, mit denen dieselben durchlaufen werden, dem rein mechanischen Verhalten der einzelnen Abschnitte, so weit dasselbe durch die Lage des Schwerpunktes, die Grössen der Massen und Trägheitsmomente und durch die Gelenkverbindungen charakterisirt wird, und den sämmtlichen auf den Körper einwirkenden äusseren und inneren Kräften. Die Bewegungsgleichungen können natürlich experimentelle Untersuchungen über die Function der Muskeln an anatomischen Präparaten und am Lebenden nicht ersetzen und daher überflüssig machen, sondern bauen sich zum Theil erst aus den Resultaten derselben auf.

Die äusserst complicirten mechanischen Verhältnisse, welche der aus so vielen durch Gelenke mit einander verbundenen Gliedern bestehende menschliche Körper darbietet, bringen es mit sich, dass die Bewegungsgleichungen für das Gehen sehr umfangreich und unübersichtlich werden. Ausserdem wird ihre Anzahl sehr gross, selbst wenn man nur die Gliederung des Körpers in die grösseren Abschnitte in Rücksicht zieht und die nicht ganz streng realisirte Annahme macht, dass diese Abschnitte sich während der Bewegung wie starre Massen verhalten. Ich habe seiner Zeit in meiner Habilitationsschrift[1]) die Methode angegeben, wie

1) Abhandl. der math.-phys. Classe der Königl. Sächs. Ges. d. Wissensch. Bd. XX Nr. I.

man die Bewegungsgleichungen in relativ einfacher Form gewinnen kann, und dieselben unter der Voraussetzung ebener Bewegungen für den Fall abgeleitet, dass der menschliche Körper aus 12 durch Gelenke untereinander verbundenen Abschnitten besteht. Dabei war jede untere Extremität aus drei, jede obere dagegen nur aus zwei starren Gliedern bestehend angenommen, und ausserdem der Kopf nur durch ein Gelenk mit dem Rumpfe in Verbindung gedacht. Diese Zerlegung reicht für die Untersuchung der Locomotionsbewegungen in erster Annäherung aus.

Die Bewegungsgleichungen lassen nun eine für die weitere Untersuchung sehr werthvolle Interpretation zu, die zugleich volles Licht auf die gegenseitige Beeinflussung der Glieder in ihren Bewegungen wirft, und welche es ausserdem ermöglicht, jede einzelne Bewegungsgleichung nicht nur für den Fall ebener Bewegung, sondern auch für den allgemeinen Fall ganz beliebiger Bewegung ohne Mühe hinzuschreiben.

Es möge zunächst der speciellere Fall ebener Bewegung, bei welcher alle Glieder sich einer bestimmten Ebene, etwa der verticalen Gangebene, parallel bewegen, ins Auge gefasst werden. Beim Gehen ist derselbe zwar nicht genau verwirklicht, da der Körper auch seitliche, d. h. zur Gangebene senkrechte Schwankungen ausführen muss, um den Gesammtschwerpunkt immer auf die Seite zu verlegen, welcher der jeweils auf dem Boden allein aufstehende Fuss angehört, es tritt aber doch die Seitenbewegung sehr zurück gegen die Bewegung parallel der Gangebene.

Bei der ebenen Bewegung ist in jedem Moment die Haltung des ganzen Körpers eindeutig bestimmt durch die beiden in die Gangebene fallenden rechtwinkligen Coordinaten irgend eines Punktes des Körpers und so viel Winkelcoordinaten als die Anzahl der Glieder beträgt, in welche der Körper zerlegt gedacht ist. Demnach hätte man im vorliegenden Falle 14 Coordinaten. Als Punkt, welcher bei dieser Coordinatenbestimmung bevorzugt wird, nimmt man zweckmässiger Weise den Gesammtschwerpunkt. Die Stellung eines jeden Gliedes kann ferner durch den Winkel bestimmt werden, welchen die Längsaxe des Gliedes mit der Verticalen bildet. Für die Bestimmung des Bewegungszustandes des Körpers kommen nun im vorliegenden Falle ausser den 14 Coordinaten noch ebensoviel Geschwindigkeiten und Beschleunigungen in Betracht. Man muss nämlich einmal die beiden Ge-

schwindigkeiten kennen, mit denen der Gesammtschwerpunkt sich in den Richtungen der beiden ebenen Coordinatenaxen bewegt, und dann die 12 Winkelgeschwindigkeiten, mit denen die Längsaxen der 12 Glieder ihre Richtung im Raume ändern. Desgleichen müssen die in die Richtung der beiden Coordinatenaxen fallenden Componenten der Beschleunigung des Gesammtschwerpunktes und die 12 Winkelbeschleunigungen der Drehungen der 12 Glieder bekannt sein. Demnach stellen die Bewegungsgleichungen die Beziehungen dar, welche zwischen den 14 Coordinaten, den 14 Geschwindigkeiten und 14 Beschleunigungen einerseits und den äusseren und inneren Kräften andererseits bestehen.

Die Anzahl der Bewegungsgleichungen ist ebenfalls im Allgemeinen 14. Davon enthalten 12 die sämmtlichen Winkelcoordinaten, Winkelgeschwindigkeiten und Winkelbeschleunigungen und ausserdem eine jede die sämmtlichen auf ein Glied einwirkenden Kräftepaare. Die noch fehlenden 2 Bewegungsgleichungen enthalten nur je eine der beiden Beschleunigungscomponenten des Gesammtschwerpunktes und die in die Richtung derselben fallende Componentensumme der äusseren Kräfte. Behält bei der Bewegung für einige Zeit ein Punkt des Körpers seinen Ort im Raume bei, wie es beispielsweise in der Periode der Fall ist, während welcher der vorn aufgesetzte Fuss sich um einen Punkt der Hacke dreht, so lässt sich die Bewegung des Gesammtschwerpunktes schon aus den Drehbewegungen der 12 Glieder ableiten; es sind dann die beiden Differentialgleichungen der Bewegung des Gesammtschwerpunktes im Grunde nur eine Folge der 12 anderen Bewegungsgleichungen, so dass sie als selbständige Gleichungen in Wegfall kommen. Ist ein ganzes Glied für einige Zeit im Raume festgestellt, wie es z. B. für den aufgesetzten Fuss der Fall ist, während er mit der ganzen Sohle mit dem Boden in Berührung ist, so verringert sich die Anzahl der Differentialgleichungen noch um eine, so dass man nur noch 11 nöthig hat, um den Bewegungszustand des Körpers in seiner Abhängigkeit von den Kräften erschöpfend darzustellen.

Die beiden Differentialgleichungen der Bewegung des Gesammtschwerpunktes sind so einfach und leicht zu interpretiren, dass sie eine weitere Discussion überflüssig machen. Sie sind der rechnerische Ausdruck für die bekannte Thatsache, dass der Gesammtschwerpunkt eines Körpers oder eines Systems beliebig vieler

Körper sich stets so bewegt, als ob die Masse des ganzen Systems in ihm vereinigt wäre, und alle äusseren Kräfte in der ihnen eigenthümlichen Richtung und Stärke direct an ihm angriffen. Dieser Satz, der ganz allgemein auch für jede beliebige räumliche Bewegung des Gesammtschwerpunktes gilt, ist schon im II. Theil der Arbeit über den Gang des Menschen dazu verwendet worden, aus den Beschleunigungen des Schwerpunktes die Grösse von Gegendruck und Reibungswiderstand des Bodens abzuleiten.

Die 12 anderen Differentialgleichungen erscheinen auf den ersten Anblick viel unübersichtlicher, und ihre Bedeutung liegt durchaus nicht so klar zu Tage. Sie sind vor allen Dingen deshalb so schwer zu durchschauen, weil eine jede derselben sich mit der Bewegung der sämmtlichen 12 Glieder des Körpers beschäftigt. Immerhin lässt sich leicht die Thatsache constatiren, dass bei jeder Differentialgleichung die Bewegung eines bestimmten Gliedes in den Vordergrund gerückt ist, insofern in ihr nur die Trägheitsmomente dieses einen Gliedes und allein die auf dasselbe einwirkenden Kräftepaare auftreten. Die genauere Untersuchung der verschiedenen in der Gleichung vorkommenden Ausdrücke, auf welche hier nicht weiter eingegangen werden soll, um den Umfang dieser einleitenden Betrachtungen nicht zu sehr zu vergrössern, zeigt nun weiter, dass jede der 12 Differentialgleichungen im Grunde als die Bewegungsgleichung für einen einzigen Körpertheil aufgefasst werden kann. Die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen aller übrigen Körpertheile treten nur insofern in der Bewegungsgleichung auf, als sie zu Druck- und Zugwirkungen auf den betreffenden Körpertheil Veranlassung geben und dadurch dessen Bewegung modificiren.

Die Wirkung der Bewegung der übrigen Glieder auf das eine ist auf's Engste verbunden mit der Bewegung der Schwerpunkte aller Systeme von Körpertheilen, welche mit dem einen durch Gelenke direct verbunden sind. Ein jedes Glied wirkt nämlich durch seine Bewegung nur insoweit auf ein anderes ein, als es die Bewegung des Schwerpunktes von demjenigen mit dem letzteren Gliede direct durch ein Gelenk verbundenen Theilsystem des ganzen Körpers beeinflusst, welchem es selbst angehört. So wirkt beispielsweise der linke Unterschenkel bei seiner Bewegung nur insofern auf den Rumpf ein, als er die Bewegung des Schwerpunktes des ganzen linken

Beins beeinflusst, und die Bewegung des Kopfes kann nur insoweit einen Einfluss auf die Drehung des rechten Oberschenkels ausüben, als durch dieselbe die Bewegung des Schwerpunktes vom System: Rumpf + Kopf + beide Arme + linkes Bein beeinträchtigt wird.

Der Schwerpunkt eines solchen Theilsystems unterliegt naturgemäss denselben Bewegungsgesetzen wie der Schwerpunkt des ganzen Körpers. Er wird sich gerade so bewegen, als ob die sämmtlichen an dem Theilsystem angreifenden äusseren Kräfte direct an ihm angriffen, und gleichzeitig in ihm die Massen sämmtlicher Abschnitte des Theilsystems concentrirt wären. Als äussere Kräfte sind dabei zunächst wieder aufzufassen die Schwere, der Luftwiderstand und für den Fall, dass entweder der eine auf dem Boden aufgesetzte Fuss oder auch beide mit dem Boden in Berührung stehenden Füsse dem Theilsystem angehören, der Gegendruck und Reibungswiderstand des Bodens. Zu diesen Kräften kommen nun aber noch andere hinzu, welche ebenfalls für das Theilsystem als äussere Kräfte aufzufassen sind. Einmal wird ein jeder Muskel, von dem ein und nur ein Insertionspunkt dem Theilsystem angehört, infolge seiner Spannung mit der in diesem Insertionspunkte angreifenden Kraft wie eine äussere Kraft auf das Theilsystem einwirken. Ferner wird an dem Mittelpunkte jedes Gelenkes, durch welches das Theilsystem mit anderen Körpertheilen in Verbindung steht, im Allgemeinen ein Druck (oder Zug) auf dasselbe ausgeübt, welcher ebenfalls im Sinne einer äusseren Kraft wirkt. Diese Druckkraft muss in jedem Augenblick nach Grösse und Richtung so beschaffen sein, dass sie im Verein mit den sämmtlichen anderen äusseren Kräften dem Schwerpunkt des Theilsystems gerade die Beschleunigung ertheilt, die er in dem betreffenden Moment aufweist.

Nach dem Satze der Gleichheit von Action und Reaction wird aber nun auch rückwärts von Seiten des Theilsystems an jedem Verbindungsgelenk auf das benachbarte Glied ein entgegengesetzt gleicher Druck ausgeübt werden. Dieser Druck, mit welchem ein mit einem Glied des menschlichen Körpers in Gelenkverbindung stehendes Theilsystem infolge der Bewegung seines Schwerpunktes und der an ihm angreifenden äusseren Kräfte auf das Glied im Mittelpunkt des Verbindungsgelenkes rückwärts einwirkt, stellt den ganzen Einfluss dar, den das Theilsystem auf die Bewegung des betreffenden Gliedes ausübt.

Zu dem gleichen Druck nach Grösse und Richtung gelangt man übrigens auch noch auf anderem Wege. Denkt man das Theilsystem vom Körper getrennt, so bleibt im Allgemeinen ein anderes Theilsystem übrig, welches das erste zu dem ganzen Körper ergänzt; dasselbe kann allerdings ebenso wie das erste im besonderen Falle auf einen einzigen Körpertheil reducirt sein. Auf dieses Ergänzungssystem muss nun von Seiten des ersten im Mittelpunkt des Verbindungsgelenkes ein Druck ausgeübt werden, welcher gerade so gross ist, dass er im Verein mit den anderen am Ergänzungssystem angreifenden Kräften dem Schwerpunkte dieses Systems seine Beschleunigung ertheilt. Es wird weiter unten gezeigt werden, dass man unter Berücksichtigung dieser Thatsache direct zu demselben Druck im Gelenk gelangt wie bei Verwendung des Satzes von der Gleichheit von Action und Reaction.

Berücksichtigt man alle an den Gelenken eines bestimmten Körpertheils auftretenden Druckwirkungen und fügt dieselben den direct an dem Körpertheil angreifenden Kräften hinzu, so findet die Bewegung des Körpertheils unter der Einwirkung aller dieser Kräfte genau so statt, als ob er mit dem übrigen Körper gar nicht mehr im Zusammenhang stände. Die Differentialgleichung der Bewegung des einen Körpertheils ist nämlich dann im Falle ebener Bewegung identisch mit einer der oben angeführten 12 Differentialgleichungen. Man sieht aber auch leicht ein, dass nach demselben Princip die zu jedem Gliede gehörenden Differentialgleichungen bei ganz beliebiger Bewegung des menschlichen Körpers auf die bekannten einfachen Differentialgleichungen der Bewegung eines starren Körpers zurückgeführt werden können.

Betrachtet man zum Beispiel den rechten Oberschenkel und wendet auf denselben diese Ueberlegungen an, so ergiebt sich Folgendes. Sieht man vom Einfluss des Luftwiderstandes und der sehr geringen Reibung in den Gelenken ab, so bewegt sich der Oberschenkel gerade so, als ob er vom übrigen Körper losgelöst wäre und auf ihn folgende Kräfte einwirkten: Erstens in seinem Schwerpunkte eine Kraft gleich dem Gewicht des Oberschenkels vertical nach unten. Zweitens in dem Insertionspunkte eines jeden direct an ihm angreifenden Muskels eine Kraft gleich der Spannung desselben, und zwar in der Richtung auf den anderen Insertionspunkt zu; für die Zugrichtung und die Lage des am

Oberschenkel befindlichen Insertionspunktes ist dabei allein das frei nach einem Nachbargliede ausgespannte Stück des Muskels maassgebend.[1]) Drittens im Mittelpunkt des Hüftgelenkes eine Druckkraft, welche entgegengesetzt gleich dem seitens des Oberschenkels auf das System: Rumpf + Kopf + beide Arme + linkes Bein ausgeübten Druck ist; der letztere hat eine solche Grösse und Richtung, dass er im Verein mit den anderen an diesem System angreifenden äusseren Kräften dem partiellen Schwerpunkte desselben seine Beschleunigung ertheilt. Dabei ist zu beachten, ob der linke Fuss auf dem Boden aufsteht oder nicht; im ersten Falle ist zu den äusseren Kräften der durch den Druck des linken Fusses auf den Boden hervorgerufene Gegendruck und Reibungswiderstand des Bodens zu zählen. Zu dem gleichen Resultat gelangt man, wenn man die im Hüftgelenkmittelpunkt auf den Oberschenkel ausgeübte Druckkraft nach Grösse und Richtung so bemisst, dass sie im Verein mit den sämmtlichen am rechten Bein angreifenden äusseren Kräften dem Schwerpunkt des ganzen rechten Beines seine Beschleunigung ertheilt. Hierbei ist zu unterscheiden, ob der rechte Fuss auf dem Boden aufsteht oder nicht, weil im ersten Falle der auf den rechten Fuss einwirkende Gegendruck und Reibungswiderstand des Bodens den an dem Beine angreifenden äusseren Kräften zuzurechnen ist. Viertens wirkt auf den Oberschenkel im Mittelpunkt des Kniegelenkes eine Druckkraft ein, welche nach Grösse und Richtung entgegengesetzt gleich dem seitens des Oberschenkels auf das System: rechter Unterschenkel + rechter Fuss ausgeübten Druck ist; letzterer muss so beschaffen sein, dass er im Verein mit sämmtlichen auf den rechten Unterschenkel und rechten Fuss einwirkenden äusseren Kräften dem Schwerpunkte dieses Systems seine Beschleunigung ertheilt. Der auf den rechten Oberschenkel im Kniegelenk einwirkende Druck kann aber auch nach Grösse und Richtung so aufgefasst werden, dass er im Verein mit den sämmtlichen am ganzen Körper mit Ausnahme des rechten Unterschenkels und rechten Fusses angreifenden äusseren Kräften dem partiellen Schwerpunkt des Systems, welches entsteht, wenn man vom Körper nur den rechten Unterschenkel und rechten Fuss lostrennt, seine Beschleunigung ertheilt.

1) Vgl. die Bemerkungen auf Seite 89.

Unter der Einwirkung dieser vier Arten von äusseren Kräften wird der Oberschenkel sich nun gerade so wie ein einziger starrer Körper bewegen. Sein Schwerpunkt wird also gerade so fortschreiten, als ob in ihm die ganze Masse des Oberschenkels concentrirt wäre, und diese äusseren Kräfte sämmtlich direct in ihm angriffen. Gleichzeitig wird der Oberschenkel in derselben Weise um seinen Schwerpunkt rotiren, als wenn der letztere festgehalten wäre, und nur die Drehungsmomente der angeführten äusseren Kräfte um Axen durch den Schwerpunkt wirkten.

Es ist wohl zu beachten, dass für die Druckwirkungen im Hüft- und Kniegelenk die absolute Bewegung der Schwerpunkte der angrenzenden Theilsysteme im Raume maassgebend ist. Die letztere kann nun in jedem Falle aufgefasst werden als die Combination zweier Bewegungen, von denen die eine relativ zum Mittelpunkt des betreffenden Verbindungsgelenkes stattfindet, während die andere mit der Bewegung dieses Gelenkmittelpunktes vollkommen übereinstimmt. Jede der beiden Theilbewegungen gibt zu einer besonderen Art von Druckwirkung auf das Gelenk Veranlassung.

Man betrachte zunächst die Bewegung des Schwerpunktes des Theilsystems, welche von der Bewegung des Gelenkmittelpunktes nicht verschieden ist, also z. B. die Componente der Bewegung des Schwerpunktes vom System: Rumpf + Kopf + beide Arme + linkes Bein, welche gleich der Bewegung des Mittelpunktes vom rechten Hüftgelenk ist. Dieselbe muss genau so auf das Hüftende des rechten Oberschenkels einwirken, als ob die ganze Masse dieses Systems im Mittelpunkt des Hüftgelenkes concentrirt, und auch alle an dem System angreifenden äusseren Kräfte unter Beibehaltung ihrer Grösse und Richtung nach demselben verlegt wären; denn dann würde der Schwerpunkt dieses Theilsystems mit dem Hüftgelenkmittelpunkt zusammenfallen und immer genau die gleiche Bewegung ausführen als dieser. Ebenso muss die Componente der Bewegung des gemeinsamen Schwerpunktes vom rechten Unterschenkel und rechten Fuss, welche mit der Bewegung des rechten Kniegelenkmittelpunktes übereinstimmt, auf das Knieende des rechten Oberschenkels gerade so einwirken, als ob die Massen des rechten Unterschenkels und Fusses im Mittelpunkt des Kniegelenkes concentrirt, und alle an diesen beiden Körpertheilen angreifenden äusseren Kräfte ebenfalls dorthin verlegt wären. Denkt man sich nun in den Mittelpunkten des Hüftgelenkes und

Kniegelenkes die Massen der angrenzenden Theilsysteme concentrirt und mit ihnen den Oberschenkel beschwert, so kommen dann nur noch die Druckwirkungen in Betracht, welche von der relativen Bewegung eines jeden Schwerpunktes der beiden angrenzenden Theilsysteme in Bezug auf den Mittelpunkt des betreffenden Verbindungsgelenkes herrühren. Das fingirte Massensystem, für welches ich schon früher[1]) den Namen „reducirtes Oberschenkelsystem" verwendet habe, und dessen Schwerpunkt der unter dem Namen „Hauptpunkt des Oberschenkels"[2]) eingeführte feste Punkt der Oberschenkellängsaxe ist, bewegt sich nun unter der Einwirkung der aus der relativen Bewegung der beiden partiellen Schwerpunkte resultirenden Druckwirkungen auf die beiden Gelenke und der sämmtlichen anderen, zum Theil ebenfalls an den Gelenkmittelpunkten, zum Theil an anderen Punkten des Oberschenkels angreifenden äusseren Kräfte ebenfalls wie ein einziger starrer Körper. Die Masse dieses Körpers ist dann gleich der Gesammtmasse des menschlichen Körpers, und seine Trägheitsmomente sind ebenfalls wesentlich von den Trägheitsmomenten des Oberschenkels verschieden.

Bei Einführung des reducirten Oberschenkelsystems und der entsprechenden anderen reducirten Systeme gelangt man nun zu viel einfacheren Formen der Bewegungsgleichungen, weil jetzt die Bewegungen der anderen Glieder nur noch insoweit einen Beitrag für dieselben liefern, als sie die zu den Mittelpunkten der Verbindungsgelenke relativen Bewegungen der partiellen Schwerpunkte beeinflussen.

Damit sind im Princip die Methoden gekennzeichnet, mit denen man auf elementare Weise zu den Bewegungsgleichungen gelangen kann, ohne den Umweg über die allgemeinen LAGRANGE'schen Differentialgleichungen machen zu müssen. Es erübrigt nur noch, den auf jedes Gelenkende des betreffenden Körpertheils ausgeübten Druck, welcher doch den Schlüssel zu der elementaren Ableitung der Bewegungsgleichungen liefert, durch die Beschleunigung des Schwerpunktes vom benachbarten Theilsystem und die auf letzteres einwirkenden äusseren Kräfte wirklich auszudrücken.

1) Vgl. Die Arbeit der Muskeln und die lebendige Kraft des menschlichen Körpers. Abhandl. der math.-phys. Classe der Königl. Sächs. Ges. d. Wiss. Bd. XX No. I. S. 61.

2) l. c. S. 60.

Die Beschleunigung des Schwerpunktes eines Theilsystems von der Masse m sei γ, dann muss die Resultante der sämmtlichen äusseren Kräfte (alle Reactionskräfte mit eingeschlossen), nachdem man sie alle parallel mit sich nach dem Schwerpunkt verlegt denkt, die Grösse $m\gamma$ und die Richtung von γ besitzen. Diese nach dem Vorgang von d'ALEMBERT als Effectivkraft bezeichnete Grösse muss sich daher als geometrische Summe der sämmtlichen äusseren Kräfte darstellen lassen. Fasst man nun insbesondere den Druck in's Auge, welcher auf das Theilsystem am Verbindungsgelenk ausgeübt wird, so muss dieser unter die äusseren Kräfte gehörende Druck sich als die geometrische Differenz aus der Effectivkraft $m\gamma$ und der geometrischen Summe der übrigen äusseren Kräfte darstellen. Demnach ist der von dem Theilsystem rückwärts auf das Nachbarglied ausgeübte Druck infolge der Gleichheit von Action und Reaction gleich der geometrischen Differenz aus der geometrischen Summe der übrigen auf das Theilsystem einwirkenden äusseren Kräfte und der Effectivkraft. Man kann auch sagen, derselbe ist gleich der geometrischen Summe der übrigen äusseren Kräfte und einer Kraft $-m\gamma$, welche zwar der Effectivkraft an Grösse gleich ist, aber die genau entgegengesetzte Richtung besitzt. Man erhält daher den Druck, welcher auf das Gelenkende irgend eines Gliedes von Seiten eines Theilsystems infolge der Bewegung des Schwerpunktes des letzteren und der an demselben angreifenden äusseren Kräfte ausgeübt wird, indem man die sämmtlichen äusseren Kräfte des Theilsystems (mit Ausnahme des Gelenkdruckes) und die der Effectivkraft entgegengesetzt gleiche Kraft $-m\gamma$ parallel nach dem Mittelpunkt des Verbindungsgelenkes verlegt und daselbst zu einer Resultante zusammensetzt. Damit steht die schon früher angeführte Thatsache in Uebereinstimmung, dass eine jede nicht an einem Körpertheil direct angreifende Kraft doch auf denselben einwirkt, und zwar so, als ob sie an dem Mittelpunkt des ihrem wahren Angriffspunkte innerhalb des menschlichen Körpers am nächsten liegenden Gelenkes des betreffenden Körpertheils angriffe. Man braucht nun nur noch im Schwerpunkte des Theilsystems sich eine äussere Kraft angebracht zu denken, welche der Effectivkraft entgegengesetzt gleich ist, um auf diese Weise sofort den gesammten Druck auf das Gelenkende eines Gliedes angeben zu können.

Auf den rechten Oberschenkel angewendet, heisst der obige

Satz: Am Mittelpunkt des Hüftgelenks wird infolge seiner Verbindung mit den anderen Körpertheilen auf den Oberschenkel ein Druck ausgeübt, welcher gerade so gross ist, als ob die sämmtlichen am System: Rumpf + Kopf + beide Arme + linkes Bein angreifenden äusseren Kräfte, den etwa auf den linken Fuss einwirkenden Gegendruck und Reibungswiderstand des Bodens mit eingerechnet, in gleicher Richtung und Stärke an diesem Punkte direct angriffen, und als ob zu diesen äusseren Kräften noch eine Kraft hinzugekommen wäre, welche durch das Product aus der Beschleunigung des Schwerpunktes dieses am Hüftgelenk hängenden Theilsystems mit der Masse des letzteren gemessen wird, und deren Richtung der Richtung der Schwerpunktsbeschleunigung entgegengesetzt ist. Ferner wird auf das andere Ende des rechten Oberschenkels im Mittelpunkt des Kniegelenks ein Druck ausgeübt, welcher gerade so gross ist, als ob alle am rechten Unterschenkel und rechten Fuss angreifenden äusseren Kräfte, den eventuell auf den rechten Fuss wirkenden Gegendruck und Reibungswiderstand des Bodens mit eingeschlossen, in gleicher Richtung und Stärke am Kniegelenkmittelpunkt selbst angriffen, und ausserdem auf denselben Punkt eine Kraft einwirkte, deren Richtung entgegengesetzt der Beschleunigungsrichtung des gemeinsamen Schwerpunktes vom rechten Unterschenkel und Fuss ist, und deren Grösse durch das Product aus dieser Schwerpunktsbeschleunigung und der Summe der Massen des rechten Unterschenkels und Fusses gemessen wird.

Wie oben angedeutet wurde, kann der auf das Hüftende des rechten Oberschenkels ausgeübte Druck auch daraus bestimmt werden, dass derselbe im Verein mit den am ganzen rechten Bein angreifenden äusseren Kräften dem Schwerpunkte des rechten Beins seine Beschleunigung ertheilt. Bezeichnet man die letztere mit γ' und die Masse des ganzen Beins mit m', so stellt sich demnach dieser Druck auch als geometrische Differenz zwischen der Effectivkraft $m'\gamma'$ und der geometrischen Summe der äusseren Kräfte des Beins, Gegendruck und Reibungswiderstand des Bodens am rechten Fuss eventuell eingeschlossen, dar.

Man kann sich leicht davon überzeugen, dass der auf die letztere Art abgeleitete Druck auf den Oberschenkel von dem auf die erste Art bestimmten nicht verschieden ist. Bezeichnet man die geometrische Summe der auf das Theilsystem: Rumpf + Kopf

+ beide Arme + linkes Bein einwirkenden äusseren Kräfte, mit Ausnahme des Drucks im Hüftgelenk, mit $\Sigma[K]$, und die geometrische Summe der ausser dem Hüftgelenkdruck auf das rechte Bein einwirkenden äusseren Kräfte mit $\Sigma[K']$, so stellt sich der im Mittelpunkt des rechten Hüftgelenks auf den Oberschenkel ausgeübte Druck das eine Mal in der Form $[\Sigma[K]] - [m\gamma]$ und das andere Mal in der Form $[m'\gamma'] - [\Sigma[K']]$ dar, wobei die eckigen Klammern um die Ausdrücke andeuten sollen, dass es sich um geometrische Addition und geometrische Subtraction handelt. Nun ist die geometrische Summe der Effectivkräfte der beiden sich zum ganzen Körper ergänzenden Theilsysteme gleich der Effectivkraft des ganzen Körpers. Bezeichnet man mit γ_0 die Beschleunigung des Gesammtschwerpunktes und mit m_0 die Gesammtmasse des menschlichen Körpers, so hat man demnach

$$[m\gamma] + [m'\gamma'] = m_0\gamma_0.$$

Die Effectivkraft $m_0\gamma_0$ ist aber andererseits gleich der Resultante der sämmtlichen nach dem Gesammtschwerpunkte verlegten äusseren Kräfte oder, mit anderen Worten, die geometrische Summe derselben. Diese hat aber denselben Werth wie die geometrische Summe von $\Sigma[K]$ und $\Sigma[K']$. Denn, wenn auch unter den äusseren Kräften eines jeden der beiden Theilsysteme solche vorkommen, die für den ganzen Körper nicht mehr äussere Kräfte darstellen, wie z. B. die Spannungen aller Muskeln, welche sich zwischen den beiden Theilsystemen ausspannen, so üben diese Kräfte doch auf den Werth der geometrischen Summe von $\Sigma[K]$ und $\Sigma[K']$ keinen Einfluss aus, da zu jeder derartigen Kraft des einen Theilsystems stets eine entgegengesetzt gleiche des anderen gehört. Es lässt sich daher die Effectivkraft $m_0\gamma_0$ durch die geometrische Summe $[\Sigma[K]] + [\Sigma[K']]$ ersetzen. Demnach kann die obige Relation auch in der Form geschrieben werden

$$[m\gamma] + [m'\gamma'] = [\Sigma[K]] + [\Sigma[K']],$$

woraus ohne Weiteres folgt, dass

$$[m'\gamma'] - [\Sigma[K']] = [\Sigma[K]] - [m\gamma] \text{ ist.}$$

Dieser Satz gilt allgemein für die Druckwirkungen an jedem Gelenk. Welche der beiden geometrischen Differenzen man im gegebenen Falle benutzen wird, richtet sich nach den besonderen Verhältnissen. Im Allgemeinen wird man natürlich die Form

bevorzugen, für welche man die nöthigen empirischen Daten schon ermittelt hat. Kennt man z. B. im vorliegenden Falle nur die Beschleunigung des Schwerpunktes vom ganzen rechten Bein, dagegen nicht die des anderen Theilsystems, so liegt es auf der Hand, dass man zu der Form $[m'\gamma'] - [\Sigma[K']]$ seine Zuflucht nimmt.

Man kann sich nun auch leicht von der Wahrheit der weiter oben angegebenen Thatsache überzeugen, dass sowohl die Muskeln als auch die äusseren Kräfte mit Kräftepaaren im POINSOT'schen Sinne auf die einzelnen Körper drehend einwirken.

Die auf einen Körpertheil direct einwirkenden Muskeln nehmen entweder eine Insertion an demselben, oder sie besitzen beide Insertionsstellen an solchen anderen Körpertheilen, welche sich zu beiden Seiten des fraglichen Körpertheils befinden und daher denselben einschliessen. Bei den Muskeln der ersten Art findet sich nach den obigen Auseinandersetzungen zu der an dem Körpertheil direct angreifenden Muskelkraft die zugehörige entgegengesetzt gleiche unter den Componenten des auf einen Gelenkmittelpunkt des Körpertheils wirkenden Druckes vor. Bei den Muskeln der zweiten Art treten beide entgegengesetzt gleichen Muskelkräfte, welche das Kräftepaar bilden, als Druckcomponenten an verschiedenen den betreffenden Körpertheil begrenzenden Gelenken auf. Alle von den auf einen Körpertheil direct einwirkenden Muskeln hervorgerufenen Kräftepaare lassen sich nun zu einem resultirenden Kräftepaar zusammensetzen, dessen Moment in Zukunft kurz als das resultirende Drehungsmoment der Muskeln bezeichnet werden soll.

Die Schwere wirkt mit mehreren Componenten auf jeden Körpertheil ein. Zunächst zieht sie mit einer Kraft gleich dem Gewicht des Körpertheils an dem Einzelschwerpunkte desselben vertical nach unten. Dann findet sich aber bei jedem auf den Mittelpunkt eines den Körpertheil begrenzenden Gelenks einwirkenden Druck eine vertical nach unten gerichtete Componente, welche gleich dem Gewicht des angrenzenden Theilsystems ist. Alle diese Schwerkräfte lassen sich zu einer Resultante zusammensetzen, die an Grösse dem Gesammtgewicht des menschlischen Körpers gleich ist, und deren Angriffspunkt gerade der Hauptpunkt des betreffenden Körpertheils ist. Zu dieser Gewichtskraft lässt sich nun, wenn der Körper nicht gerade frei in der Luft schwebt, in jedem Falle eine entgegengesetzt gleiche

finden, welche sie zu einem Kräftepaar ergänzt. Diese zweite Kraft des Paares wird nämlich durch den Gegendruck des Fussbodens verursacht. Steht der Körper nur mit einem Fusse auf dem Boden, so setzt sich der Gegendruck des Bodens aus zwei Componenten zusammen, deren eine die verticale Componente der Effectivkraft $m_0\gamma_0$ darstellt, während die andere gleich dem Gewicht des Körpers aber vertical nach oben gerichtet ist. Diese letztere Componente muss sich nun nach den obigen Darlegungen jedesmal unter den Componenten des Druckes an demjenigen Gelenkmittelpunkt des betreffenden Körpertheils vorfinden, welcher innerhalb des menschlichen Körpers dem aufgesetzten Fuss am nächsten liegt. Ist beispielsweise der rechte Fuss allein auf dem Boden aufgesetzt, so wirkt die dem Gesammtgewicht des Körpers entgegengesetzt gleiche Druckcomponente am Mittelpunkt des rechten Kniegelenks, steht dagegen der linke Fuss allein auf dem Boden, so wirkt sie am Mittelpunkt des rechten Hüftgelenks auf den rechten Oberschenkel ein. In dem Falle, dass beide Füsse mit dem Boden in Berührung sind, wird im Allgemeinen an keinem Fuss die eine Componente des Gegendrucks entgegengesetzt gleich dem Gewicht des Körpers sein. Dagegen wird in der Regel an jedem Fuss eine von dem Gewicht des Körpers allein herrührende Componente des Gegendrucks auftreten, und es ist unter allen Umständen die Summe dieser beiden vertical nach oben gerichteten Componenten entgegengesetzt gleich dem Gesammtgewicht des menschlichen Körpers. Jede dieser beiden Componenten wird dann als Druck an einem anderen Gelenk des Körpertheils auftreten. Da beide Druckkräfte gleichgerichtet sind, so lassen sie sich zu einer Resultante zusammensetzen, deren Grösse gleich dem Gesammtgewicht ist, und welche in einem bestimmten Punkte im Innern des betreffenden Körpertheils angreift und vertical nach oben gerichtet ist. Diese Resultante setzt sich dann mit der im Hauptpunkte des Körpertheils angreifenden Gewichtskraft zu einem Kräftepaar zusammen. Da die hier in Betracht kommende Componente des Bodengegendruckes auch im Grunde durch die Schwere hervorgerufen ist, so soll das Moment des Kräftepaares, mit dem diese Componente und die Schwere selbst im gegebenen Falle gemeinsam auf einen Körpertheil einwirken, in Zukunft kurz als das Drehungsmoment der Schwere bezeichnet sein.

In dem resultirenden Drehungsmoment der Muskeln eines Körpertheils und dem Drehungsmoment der Schwere ist in sehr knapper und übersichtlicher Form der Einfluss zusammengefasst, den Muskeln und Schwere auf die Bewegung eines einzelnen Körperteils ausüben. Es bleiben dann, vom Luftwiderstand abgesehen, überhaupt nur noch die Kräfte zu betrachten übrig, welche von den Beschleunigungen partieller Schwerpunkte und des Gesammtschwerpunktes abhängen. Auch diese gruppiren sich in bestimmter Weise zu Kräftepaaren, mit denen sie den Körpertheil zu drehen suchen.

An dem rechten Oberschenkel wirkt beispielsweise unter den Componenten des Druckes im Mittelpunkt des rechten Hüftgelenks die Kraft $-m\gamma$, unter m, wie oben, die Masse des Systems: Rumpf + Kopf + beide Arme + linkes Bein, und unter γ die Beschleunigung des zugehörigen Schwerpunktes verstanden. Das negative Vorzeichen sagt aus, dass die Kraft zu der Beschleunigung γ entgegengesetzt gerichtet ist. Im Mittelpunkt des Kniegelenks wirkt die Kraft $-m''\gamma''$, wo m'' die Masse des Systems: rechter Unterschenkel + rechter Fuss, und γ'' die Beschleunigung seines Schwerpunktes bedeutet. Diese beiden Druckcomponenten sind stets vorhanden, auch wenn der Körper frei in der Luft schwebt. Ist nun aber einer der beiden Füsse mit dem Boden in Berührung, so kommt infolge der Gegenwirkung und des Reibungswiderstandes des Bodens im Kniegelenk oder im Hüftgelenk noch die Druckkraft $m_0\gamma_0$ hinzu, je nachdem es der rechte oder der linke Fuss ist, welcher allein auf dem Boden aufsteht; dabei bedeutet wieder m_0 die Gesammtmasse des ganzen Körpers und γ_0 die Beschleunigung des Gesammtschwerpunktes. Stehen beide Füsse auf dem Boden auf, so vertheilt sich im Allgemeinen die Druckkraft $m_0\gamma_0$, welche zum Theil den Gegenwirkungen, zum Theil den Reibungswiderständen des Bodens ihre Entstehung verdankt, auf zwei im Knie- und Hüftgelenkmittelpunkt angreifende Componenten.

Zieht man zunächst den Fall in Betracht, dass allein der rechte Fuss auf dem Boden aufsteht, so hat man demnach im Mittelpunkt des rechten Kniegelenkes die beiden auf den Oberschenkel einwirkenden Druckcomponenten $m_0\gamma_0$ und $-m''\gamma''$. Diese beiden Kräfte haben nun als Resultante die zum System: Rumpf + Kopf + beide Arme + linkes Bein + rechter Oberschenkel ge-

hörende Effectivkraft; denn dieses System ergänzt das System: rechter Unterschenkel + rechter Fuss zum ganzen Körper. Diese letztere Effectivkraft kann in die zwei Componenten $m\gamma$ und $m_2\gamma_2$ zerlegt werden, wo m und γ die oben angegebene Bedeutung besitzen, dagegen unter m_2 die Masse des rechten Oberschenkels, und unter γ_2 die Beschleunigung seines Schwerpunktes zu verstehen ist. Die am Kniegelenk angreifende Druckcomponente $m\gamma$ ist entgegengesetzt gleich der am Hüftgelenk wirkenden Druckcomponente $-m\gamma$; beide bilden daher ein Kräftepaar. Es bleibt so zunächst als einzige äussere Kraft des rechten Oberschenkels, welche nicht an der Zusammensetzung eines Kräftepaares betheiligt zu sein scheint, die im Mittelpunkt des rechten Kniegelenkes wirkende Druckcomponente $m_2\gamma_2$. Da Kräftepaare die Bewegung des Schwerpunktes eines Körpers nicht beeinflussen können, weil die eine Kraft des Paares dem Schwerpunkt immer die entgegengesetzte Beschleunigung aufzwingen will als die andere, so muss sich der Schwerpunkt des rechten Oberschenkels so bewegen, als ob an ihm allein die Kraft $m_2\gamma_2$ angriffe und in ihm die Masse m_2 des Oberschenkels concentrirt wäre. Dies stimmt aber vollkommen damit überein, dass γ_2 die Beschleunigung desselben darstellt. Die am Kniegelenkmittelpunkt angreifende Druckkraft $m_2\gamma_2$ wird nun ausser der Beschleunigung des Schwerpunktes auch noch eine Drehung des rechten Oberschenkels hervorzubringen suchen, wenn ihre Richtung nicht gerade durch den Schwerpunkt S_2 des Oberschenkels hindurchgeht. Dieses Drehungsbestreben der Kraft kann man endlich auch als das Moment eines Kräftepaares auffassen. Man braucht sich zu diesem Zwecke nur im Schwerpunkt S_2 die Effectivkraft $m_2\gamma_2$ und gleichzeitig die ihr entgegengesetzt gleiche Kraft $-m_2\gamma_2$ angebracht zu denken. Diese beiden Kräfte können zusammen den Bewegungszustand des Oberschenkels nicht ändern, da sie sich das Gleichgewicht halten. Man kann die Kraft $-m_2\gamma_2$ mit der am Kniegelenkmittelpunkt angreifenden, ihr entgegengesetzt gleichen Druckcomponente $+m_2\gamma_2$ zu einem Kräftepaar vereinigt denken, dann bleibt schliesslich nur noch die Effectivkraft $m_2\gamma_2$ übrig, welche allein dem rechten Oberschenkel eine Translationsbewegung von der Beschleunigung γ_2, also eine Bewegung ohne Drehung zu ertheilen sucht, während die beiden Kräftepaare $[+m\gamma, -m\gamma]$ und $[+m_2\gamma_2, -m_2\gamma_2]$ umgekehrt ausschliesslich auf den Körpertheil im Sinne einer Drehung um eine

Axe durch den Schwerpunkt S_2 einzuwirken suchen. Diese beiden Kräftepaare lassen sich nun weiterhin zu einem einzigen Paare vereinigen, dessen Moment kurz das resultirende Drehungsmoment der Effectivkräfte heissen soll.

Ist allein der linke Fuss auf dem Boden aufgesetzt, so hat man im Mittelpunkt des rechten Kniegelenkes zunächst wieder die Druckcomponente $-m''\gamma''$, während jetzt am rechten Hüftgelenk zu der Componente $-m\gamma$ noch die von Gegendruck und Reibungswiderstand des Bodens herrührende Componente $m_0\gamma_0$ hinzutritt; diese beiden haben als Resultante die Effectivkraft für das ganze rechte Bein, welche weiter oben (S. 106) mit $m'\gamma'$ bezeichnet worden ist. Die letztere lässt sich wiederum in die beiden Componenten $m''\gamma''$ und $m_2\gamma_2$ zerlegen, von denen die Druckcomponente $m''\gamma''$ mit der am Kniegelenkmittelpunkt angreifenden, ihr entgegengesetzt gleichen Druckcomponente $-m''\gamma''$ ein Kräftepaar bildet. Denkt man sich wiederum im Schwerpunkte S_2 des rechten Oberschenkels die Effectivkraft $m_2\gamma_2$ und die ihr entgegengesetzt gleiche Kraft $-m_2\gamma_2$ angebracht, so kann man weiterhin die letztere mit der am Hüftgelenkmittelpunkt angreifenden Druckcomponente $m_2\gamma_2$ zu einem Kräftepaar vereinigt denken. Es bleibt dann wieder allein die in S_2 angreifende Effectivkraft übrig als Kraft, welche dem ganzen Oberschenkel eine Translationsbewegung mit der Beschleunigung γ_2 zu ertheilen strebt. Die beiden Kräftepaare $[+m''\gamma'', -m''\gamma'']$ und $[+m_2\gamma_2, -m_2\gamma_2]$ suchen dann dem Oberschenkel ausschliesslich Drehung um eine Axe durch seinen Schwerpunkt zu ertheilen; die Momente derselben setzen wieder das resultirende Drehungsmoment der Effectivkräfte zusammen. Es ist zu beachten, dass das letztere der beiden Kräftepaare nicht dasselbe Moment besitzt, wie das auf dieselbe Weise bezeichnete im vorhergehenden Falle. Denn während dort die eine Kraft des Paares im Schwerpunkt S_2 und die andere im Mittelpunkt des Kniegelenkes angriff, nimmt hier zwar auch die eine ihren Angriff am Schwerpunkt S_2, die andere dagegen am Mittelpunkt des Hüftgelenkes.

Stehen endlich beide Füsse auf dem Boden auf, so kommen an beiden Gelenkmittelpunkten zu den Druckcomponenten $-m\gamma$ bezüglich $-m''\gamma''$ noch Kräfte hinzu. Diese beiden hinzutretenden Kräfte sind stets so beschaffen, dass sie, nach einem Punkte verlegt, wiederum die Kraft $m_0\gamma_0$ als Resultante ergeben. Will man

sich in diesem Falle die drehenden Kräftepaare veranschaulichen, so ist es zweckmässig, am Schwerpunkte S_2 die 6 Kräfte, $+m\gamma$, $-m\gamma$, $+m''\gamma''$, $-m''\gamma''$, $+m_0\gamma_0$ und $-m_0\gamma_0$ angebracht zu denken, von denen je zwei entgegengesetzt gleich sind, so dass sie alle zusammen sich das Gleichgewicht halten. Von diesen Kräften bildet die erste mit der am Hüftgelenkmittelpunkt angreifenden Druckcomponente $-m\gamma$ und die dritte mit der am Kniegelenkmittelpunkt angreifenden Componente $-m''\gamma''$ je ein Kräftepaar. Denkt man sich weiter die sechste Kraft in zwei Componenten zerlegt, welche den beiden durch den Gegendruck und den Reibungswiderstand des Bodens am Hüft- und Kniegelenkmittelpunkte erzeugten Druckcomponenten entgegengesetzt gleich sind, so erhält man zwei weitere Kräftepaare. Alle vier Kräftepaare lassen sich nun wiederum zu einem resultirenden zusammensetzen, dessen Moment das resultirende Drehungsmoment der Effectivkräfte darstellt. Denn die drei noch übrigbleibenden, am Schwerpunkte S_2 angreifenden Kräfte $-m\gamma$, $-m''\gamma''$ und $+m_0\gamma_0$ ergeben als Resultante die Effectivkraft $m_2\gamma_2$, welche dem Oberschenkel allein eine Translationsbewegung von der Beschleunigung γ_2 zu ertheilen sucht.

Durch die Bestimmung der die Drehung eines Körpertheils beeinflussenden Kräftepaare, mit denen die sämmtlichen äusseren Kräfte auf ihn einwirken, ist man nun in den Stand gesetzt, die Bewegungsgleichung des Körpertheils in äusserst knapper Form hinzuschreiben. Für den angenommenen Fall ebener Bewegung, bei der alle Bewegungen der Körpertheile parallel der Gangebene stattfinden, und auch die Ebenen aller wirksamen Kräftepaare dieser Ebene parallel sind, nimmt die zu einem jeden Körpertheil gehörende Bewegungsgleichung die einfache Form an: Das Product aus dem Trägheitsmoment des Körpertheils um die zur Gangebene normale Axe durch seinen Schwerpunkt und seiner Winkelbeschleunigung um dieselbe Axe ist gleich der Summe aus dem resultirenden Drehungsmoment der Muskeln, dem Drehungsmoment der Schwere und dem resultirenden Drehungsmoment der Effectivkräfte. Dieser Satz gilt ganz allgemein für jedes Glied des menschlichen Körpers, auch wenn dasselbe, wie der Rumpf, durch mehr als zwei Gelenke mit anderen Körpertheilen verbunden ist; man hat in dem letzteren Fall eben nur die an dem speciellen

Beispiel des Oberschenkels angestellten Betrachtungen, welche zu der Bestimmung der Drehungsmomente der Effectivkräfte führten, zu verallgemeinern. Der Satz erleidet auch keine Einschränkung, wenn die Bewegung keine ebene mehr ist. Er gilt in diesem allgemeineren Falle für jede Projection des ganzen Bewegungsvorganges auf eine der drei Coordinatenebenen.

Damit ist nun der Weg klar vorgezeichnet, den man für die weitere Untersuchung des Ganges auf der Grundlage der im I. Theile genauer beschriebenen Registrirung des ganzen Bewegungsvorganges zu beschreiten hat.

Man hat sich zunächst mit Hülfe der Coordinaten der Gelenkmittelpunkte für jeden Körpertheil die successiven Stellungen im Raume, die Winkelgeschwindigkeiten, mit denen er seine Richtung im Raume ändert, und daraus die Winkelbeschleunigungen dieser Drehungen für jede Phase der Bewegung zu verschaffen. Da die Trägheitsmomente der einzelnen Körpertheile des Versuchsindividuums aus den Resultaten früherer Untersuchungen[1]) abgeleitet werden können, so ist man damit schon in den Stand gesetzt, für die Bewegungsgleichung eines jeden Körpertheils die successiven Werthe der einen Seite, nämlich die Werthe der Producte von Trägheitsmomenten und Winkelbeschleunigungen anzugeben. Durch die Kenntniss der successiven Stellungen der einzelnen Glieder gewinnt man gleichzeitig die Mittel zur Bestimmung der successiven Werthe der „Drehungsmomente der Schwere". Leitet man ferner aus den schon im II. Theile angegebenen Coordinaten der einzelnen Schwerpunkte die Geschwindigkeiten und daraus die Beschleunigungen der Bewegung eines jeden ab, so hat man damit die nöthigen Unterlagen gewonnen, die Werthe des resultirenden Drehungsmomentes der Effectivkräfte für jeden Körpertheil zu berechnen. Auf diese Weise lassen sich dann für jede Bewegungsphase die Werthe der sämmtlichen die Bewegungsgleichung zusammensetzenden Ausdrücke mit Ausnahme des „resultirenden Drehungsmomentes der Muskeln" angeben. Man kann daher die Bewegungsgleichungen dazu verwenden, die Werthe des resultirenden Drehungsmomentes der Muskeln für jeden Körpertheil und jeden Moment der Bewegung zu berechnen, und gewinnt dadurch

1) Vgl. Bestimmung der Trägheitsmomente des menschlichen Körpers und seiner Glieder. Abhandl. der math.-phys. Classe der Königl. Sächs. Ges. d. Wiss. Bd. XVIII No. VIII.

die nothwendige feste Grundlage für die weitere Untersuchung über die Thätigkeit der Muskeln beim menschlichen Gange.

Die weitere Untersuchung soll sich nun mit der Bewegung der unteren Extremitäten in dem angedeuteten Sinne befassen. In dem vorliegenden III. Theil der Arbeit über den Gang des Menschen soll zunächst ein Ueberblick über die aufeinanderfolgenden Haltungen der Beine und der successiven Stellungen der einzelnen Glieder gegeben werden. Die späteren Arbeiten werden sich dann mit der Ableitung der Winkelbeschleunigungen der einzelnen Theile der unteren Extremitäten, sowie der Beschleunigungen ihrer Schwerpunkte und, unter Zuhülfenahme der Bewegungsgleichungen, mit der Bestimmung der Werthe der resultirenden Drehungsmomente der auf die einzelnen Abschnitte wirkenden Muskeln zu beschäftigen haben.

Das Verhalten der Beine im Allgemeinen

graphie bei den Versuchen herausgegriffenen Bewegungsphasen, deren Intervalle in gar keinem einfachen Verhältniss zu der Schrittdauer standen, sondern sie gibt Bewegungsphasen wieder, durch welche die Dauer eines Doppelschrittes in genau zwanzig gleiche Theile zerlegt wird. Dabei ist alles, was zur rechten Extremität gehört, schwarz, und alles zur linken Extremität Gehörende roth gezeichnet worden. Die 1. Phase entspricht dem Moment, in welchem das rechte Bein seine Schwingung beginnt; die 21. Phase stellt daher nur eine Wiederholung der 1. dar, indem sie gerade um die Länge eines Doppelschrittes von ihr entfernt ist. Da bei der Darstellung genau symmetrisches Verhalten beider Beine vorausgesetzt wurde, so entspricht die 11. Phase genau dem Moment, in welchem das linke Bein seine Schwingung beginnt. Das rechte Bein setzt sich auf den Boden zwischen der 9. und 10. Phase des Bildes, etwas näher der ersteren als der letzteren. Daher wird zwischen der 19. und 20. Phase das linke Bein sich auf den Boden aufstellen.

Die Darstellung des Bewegungsvorganges des ganzen Körpers, nicht allein der unteren Extremitäten, durch 20 Phasen ist schon früher zur Construction eines Gangmodells[1]) verwendet worden. In der unten angeführten Beschreibung desselben ist das Verfahren zur Gewinnung der 20 Bewegungsphasen nicht auseinandergesetzt, sondern hinsichtlich desselben auf einen späteren Theil der Untersuchung über den Gang des Menschen verwiesen worden. Es ist daher nöthig, an dieser Stelle auf den Gegenstand etwas näher einzugehen.

Die Haltung des Körpers für einen beliebigen Moment, welcher nicht bei der photographischen Aufnahme des ganzen Bewegungsvorganges fixirt worden ist, lässt sich ebenso genau wie für die photographirten Bewegungsphasen mit Hülfe der schon im II. Theil verwendeten Wegcurven ermitteln. Dieselben stellen die Abhängigkeit der Coordinaten irgend eines Punktes des menschlichen Körpers von der Zeit dar, indem sie als Abscissen Strecken besitzen, welche der von einem bestimmten Moment an verstrichenen Zeit proportional sind, während ihre Ordinaten direct gleich den Längen der betreffenden Coordinate sind. Verschafft man sich nun für jede der drei Coordinaten von sämmtlichen Ge-

1) Vgl. Beschreibung eines neuen Modells zur Veranschaulichung der Bewegungen beim Gange des Menschen. Archiv für Anatomie und Physiologie. Anatomische Abteilung 1895. S. 257.

lenkmittelpunkten der beiden unteren Extremitäten die Wegcurve, indem man, wie früher bei den Wegcurven des Gesammtschwerpunktes, 1 Secunde durch die Länge von 1 dm darstellt, so kann man für alle Momente, die in Intervallen von $^1/_{1000}$ Secunde aufeinanderfolgen, die zugehörigen Werthe der betreffenden Coordinate aus jeder Wegcurve abmessen. Theilt man nun die Strecke der Abscisse, welche der doppelten Schrittdauer proportional, also beim 1. Versuch, für welchen die Schrittdauer 0,990 sec betrug, gleich 99 mm ist, in 20 gleiche Theile, so erhält man in der Länge von 4,95 mm den Repräsentanten des Zeitintervalles zwischen zwei aufeinanderfolgenden der 20 Bewewegungsphasen, in welche der Doppelschritt zerlegt werden soll. Da die 1. und 21. Phase dem Moment entsprechen sollen, in dem das rechte Bein seine Schwingung beginnt, andererseits aber dieser Moment bei der photographischen Aufnahme des 1. Versuches gerade durch die dort mit der Nummer 25 versehene Bewegungsphase dargestellt war, so hat man nur von dem zu letzterer gehörigen Abscissenpunkte aus nach rechts und links auf der Abscisse so oft wie möglich Strecken von 4,95 mm abzutragen, und die zu den Endpunkten dieser Strecken gehörenden Ordinaten zu messen, um die gesuchten Coordinatenwerthe zu erhalten.

Ordnete man dem Nullpunkt der Abscissenlinie die 1. Phase der photographischen Aufnahme zu, so gehörte zu der 25. Phase die Abscissenlänge von 92 mm.[1]) Demnach hat man zur Gewinnung der 21 Bewegungsphasen, welche den Vorgang innerhalb eines Doppelschrittes in 20 gleiche Theile zerlegen, und von denen die 1. und 21. den Anfang der Schwingung des rechten Beins bedeuten, folgende Abscissenwerthe der Wegcurven zu berücksichtigen:

Tabelle 1.

Nummer der Bewegungsphase	Abscissenwerthe in Millimetern	Nummer der Bewegungsphase	Abscissenwerthe in Millimetern
1	92,00	6	17,75
2	96,95	7	22,70
3	2,90 oder 101,90	8	27,65
4	7,85 oder 106,85	9	32,60
5	12,80 oder 111,80	10	37,55

1) Vgl. der Gang des Menschen. II. Theil. S. 82.

Nummer der Bewegungsphase	Abscissenwerthe in Millimetern	Nummer der Bewegungsphase	Abscissenwerthe in Millimetern
11	42,50	17	72,20
12	47,45	18	77,15
13	52,40	19	82,10
14	57,35	20	87,05
15	62,30	21	92,00
16	67,25		

Da die Punkte der Abscissenlinie, welche zu den beiden ersten Phasen gehören, links vom Nullpunkt fallen würden, so sind sie um die der doppelten Schrittdauer entsprechende Strecke von 99 mm nach rechts verschoben worden. Die zu letzteren gehörenden Werthe sämmtlicher y- und z-Coordinaten sind infolge der periodischen Wiederholung des ganzen Bewegungsvorganges nach Ablauf von 0,990 sec genau dieselben wie die den Phasen Nr. 1 u. 2 entsprechenden, obgleich sie in Wirklichkeit der 21. und der auf diese folgenden Phase angehören. Die x-Coordinate ist jedoch für die 21. Phase um die doppelte Schrittlänge von 155,75 cm grösser als für die 1.; das gleiche gilt für alle folgenden Phasen. Berücksichtigt man dies, so kann man einmal für die beiden ersten Phasen die Coordinaten aus den grösseren Abscissenwerthen gewinnen, und hat ferner für die Phasen Nr. 3, 4 und 5 die Möglichkeit doppelter Ableitung, so dass man auf diese Weise eine Controlle über die Genauigkeit der Resultate für die beiden ersten Phasen ausüben kann.

Mit Hülfe der kleinen Tabelle lässt sich nun auch leicht ermitteln, mit welcher der auf Tafel I aufgezeichneten Bewegungsphasen bestimmte ausgezeichnete Stellungen des ganzen Beines zusammenfallen, bezüglich zwischen welchen Phasen sie zu suchen sind. Man braucht dabei nur noch die Tabelle 9 auf S. 82 des II. Theiles zu Rathe zu ziehen. Wie schon oben erwähnt, fällt das Aufsetzen des rechten Beins (R) zwischen die 9. und 10. Phase. Aus der angeführten Tabelle 9 leitet man ab, dass der entsprechende genaue Abscissenwerth 34,5 mm beträgt. Daraus folgt, dass dem Aufsetzen des rechten Beins die Phasennummer 9,4 zukommt, was so zu verstehen ist, dass es mit der vierten von 9 zwischen der 9. und 10. Phase in gleichen Zeitintervallen eingeschalteten Zwischenphasen zusammenfallen würde. Der rechte Fuss stellt

sich nach jener Tabelle 9 mit der ganzen Sohle auf den Boden (A_r), wenn in der Wegcurve die Abscisse den Werth von 46 mm angenommen hat. Demnach findet in der Darstellung auf Tafel I dieser Vorgang zwischen der 11. und 12. Phase, nämlich in der Zwischenphase von der Nummer 11,7 statt. Endlich verlässt der rechte Fuss mit der Hacke den Boden, um sich um einen weiter vorn gelegenen Punkt der Sohle zu drehen und sich allmählig vom Boden abzuwickeln (E_r), wenn die Abscisse den Werth 72,8 mm erreicht hat; dies entspricht der nahe an der 17. Phase gelegenen Zwischenphase 17,1. Die entsprechenden Vorgänge am linken Fuss finden infolge der bei der Darstellung zu Grunde gelegten vollkommenen Symmetrie der Bewegung genau um 10 Bewegungsphasen früher oder später statt.

Diese verschiedenen charakteristischen Momente finden sich in der Darstellung auf Tafel I durch die schon früher, z. B. auch in Tabelle 9 des II. Theiles, verwendeten Bezeichnungen an der Stelle, welche dabei jeweils der Femurkopf der betreffenden Extremität einnehmen würde, markirt. Es bedeutet also, um es noch einmal zu wiederholen, S_r resp. S_l den Moment, in welchem das rechte resp. linke Bein seine Schwingung beginnt, R resp. L den Moment, in welchem das rechte resp. linke Bein sich auf den Boden vorn aufstellt, A_r resp. A_l den Moment, in welchem der rechte resp. linke Fuss sich mit der ganzen Sohle auf den Boden aufsetzt und endlich E_r resp. E_l den Moment, in welchem der rechte resp. linke Fuss beginnt, sich vom Boden abzuwickeln. —

Aus der Darstellung der Bewegung der unteren Extremitäten auf Tafel I lassen sich nun schon ohne eingehendere Untersuchung folgende Einzelheiten für die Projection des Bewegungsvorganges auf die Gangebene erkennen:

Zu Anfang der Periode des Schwingens ist das betreffende Bein stark rückwärts gestellt, so dass sowohl die Längsaxe des Oberschenkels wie die des Unterschenkels nach hinten gegen die Verticale geneigt ist. Der Winkel mit der Verticalen ist jedoch beim Unterschenkel grösser als beim Oberschenkel, da das Kniegelenk sich nicht in Streckstellung befindet, sondern etwas gebeugt ist. Der Fuss berührt gerade noch mit seiner äussersten Spitze den Boden. Der Oberschenkel dreht sich nun nach vorn, d. h. von der rechten Seite aus gesehen, im umgekehrten Sinne des Uhrzeigers; er passirt kurze Zeit, nachdem das andere Bein

sich mit der ganzen Sohle auf den Boden aufgestellt hat, die Verticale und dreht sich dann immer in demselben Sinne weiter bis kurz vor dem Moment, in dem das andere Bein beginnt, sich vom Boden mit dem Fusse abzuwickeln. Dann bewegt sich der Oberschenkel in der Projection auf die Gangebene kurze Zeit parallel fort, bezüglich dreht sich sogar ein wenig wieder nach hinten, führt aber vor dem Aufsetzen des Beins auf dem Boden nochmals eine ausgesprochene Drehung nach vorn aus, so dass seine Längsaxe im Moment des Aufsetzens den grössten Winkel nach vorn mit der Verticalen bildet.

Der Unterschenkel zeigt nicht genau dasselbe Verhalten wie der Oberschenkel. Er dreht sich zu Anfang der Periode des Schwingens zunächst rückwärts, d. h. also in der Ansicht von rechts im Sinne des Uhrzeigers. Diese Rückwärtsdrehung dauert etwa bis zu dem Moment, in welchem die Längsaxe des Oberschenkels die Verticale passirt, dann beginnt eine Drehung des Unterschenkels nach vorn, welche die gleichzeitige Vorwärtsdrehung des Oberschenkels an Geschwindigkeit bedeutend übertrifft. Diese Vorwärtsdrehung des Unterschenkels dauert auch noch an, während der Oberschenkel kurze Zeit sich zurückdreht. Nahezu in dem Moment, in welchem der Oberschenkel seine letzte Drehung nach vorn beginnt, kehrt aber der Unterschenkel die Richtung seiner Drehung um und begleitet die letzte Vorwärtsdrehung des Oberschenkels mit einer diese an Geschwindigkeit wieder übertreffenden Rückwärtsbewegung. Die Folge davon ist, dass die Längsaxe des Unterschenkels im Moment des Aufsetzens des Beins auf den Boden nicht mehr den grössten Winkel nach vorn mit der Verticalen bildet, wie sie auch zu Beginn der Schwingung noch nicht am weitsten nach hinten gegen die Verticale geneigt war.

Aus dem verschiedenen Verhalten von Oberschenkel und Unterschenkel während der Periode des Schwingens folgt nun weiter, dass das Kniegelenk während dieser Zeit seine Stellung nicht beibehält, sondern theils gebeugt, theils gestreckt wird. Zu Anfang wird es gebeugt, da sich der Oberschenkel nach vorn und der Unterschenkel nach hinten dreht. Kurz nach dem Moment, in welchem die Längsaxe des Oberschenkels vertical stand, ist die grösste Beugestellung des Kniegelenks erreicht, welche überhaupt beim Gehen vorkommt. Darauf findet nun infolge der grösseren

Geschwindigkeit in der Vorwärtsdrehung des Unterschenkels ziemlich energische Streckung des Kniegelenks statt, welche so lange andauert, bis der Unterschenkel kurz vor dem Aufsetzen des Beins seinen Drehungssinn umkehrt. Zuletzt ist dann wieder eine deutlich ausgesprochene Beugung im Kniegelenk zu erkennen, so dass das Bein sich nicht mit gestrecktem, sondern etwas gebeugtem Kniegelenk auf den Boden aufsetzt. Alle diese Thatsachen lassen sich auch sehr deutlich aus der folgenden Figur 1

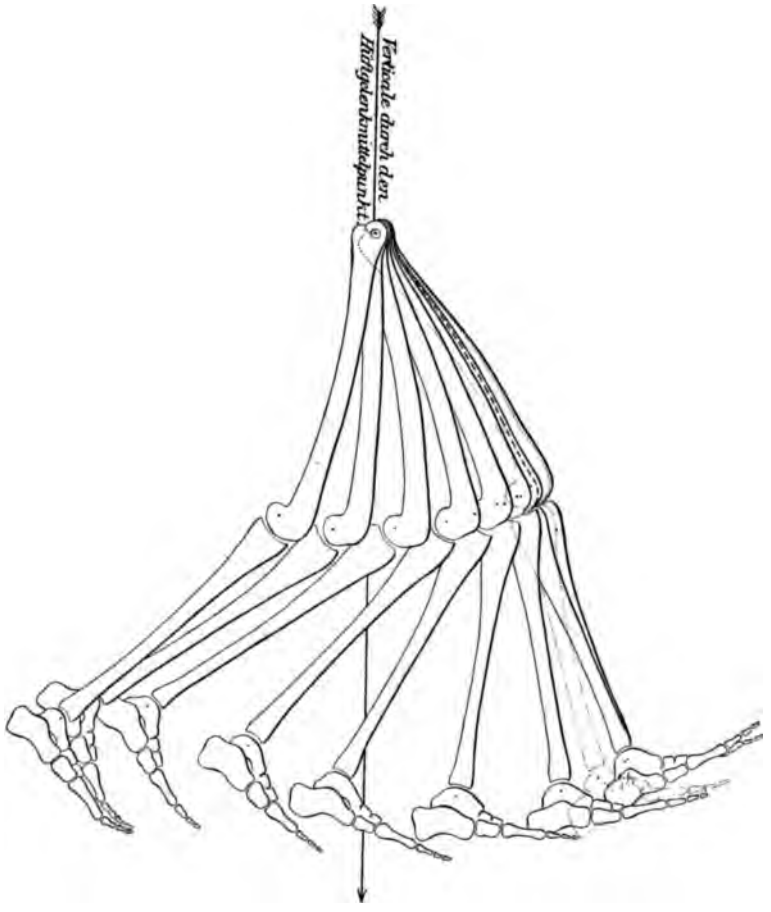


Fig. 1.

erkennen, welche unter Verwendung derselben Bewegungsphasen wie auf Tafel I die Bewegung des rechten Beines relativ zum Mittelpunkt des Hüftgelenks während der Periode des Schwingens veranschaulicht. Die letzte durch schwache Punkte angegebene Stellung des Beins entspricht der 10. Phase von Tafel I, gehört also schon zur Periode des Aufstehens.

Was endlich die Bewegung des Fusses in der Periode des Schwingens anlangt, so lässt sich aus Tafel I ersehen, dass der Fuss in der Projection auf die Gangebene im Allgemeinen dieselbe Bewegung ausführt, wie der Unterschenkel. Er dreht sich im Raume zuerst etwas rückwärts, d. h. im Sinne des Uhrzeigers, dann aber mit verhältnissmässig grosser Geschwindigkeit in der umgekehrten Richtung des Uhrzeigers, bis er zuletzt kurz vor seinem Aufsetzen auf den Boden wieder den Drehungssinn umkehrt. Während beim Oberschenkel und Unterschenkel die Bewegung in der Projection auf die Gangebene nicht allzusehr von der räumlichen Bewegung verschieden ist, weil die seitlichen Drehungen dieser beiden Körpertheile verhältnissmässig gering sind, giebt die eine Projectionsbewegung des Fusses noch kein vollkommenes Bild von dem Verhalten desselben. Es bedarf daher erst der Untersuchung der Bewegung des Fusses in wenigstens noch einer anderen Projection, um die räumliche Bewegung mit genügender Schärfe feststellen zu können.

Würde die Bewegung des Fusses in der Projection auf die Gangebene vollkommen mit der des Unterschenkels übereinstimmen, so würde wenigstens in dieser Projection des Bewegungsvorganges keine Aenderung der Stellung des Fussgelenks stattfinden können. Es liegt aber in der Natur der Sache, dass im Fussgelenk Bewegung auch in der Periode des Schwingens eintritt. Denn zu Anfang dieser Periode wird der Fuss sich infolge des Abwickelns vom Boden in ausgesprochener Plantarflexion befinden, und im Laufe der Schwingung wird voraussichtlich im Fussgelenk Dorsalflexion stattfinden, und damit der Fuss in seine mittlere Haltung zum Unterschenkel zurückkehren, weil dieselbe die geringere Muskelaction erfordert. Dies ist denn auch thatsächlich der Fall, wie später noch nachgewiesen werden soll; in der Figur auf Tafel I ist es jedoch nicht so ausgesprochen und so deutlich zu erkennen, wie die bisher angeführten Thatsachen. —

In der Periode des Aufstehens eines Beines führt der Oberschenkel desselben bis kurz vor dem Ende dieser Periode im Grossen und Ganzen die Drehungen, welche er in der Periode des Schwingens zeigte, in umgekehrter Richtung und auch in umgekehrter Reihenfolge aus. Im Moment des Aufsetzens des Beines auf den Boden beginnt er eine kurze Drehung in der Richtung des Uhrzeigers. Dieselbe ist in der Figur auf Tafel I nicht zu

erkennen, weil die Phase des Aufsetzens, welche zwischen die Phasen 9 und 10 hineinfällt, nicht aufgezeichnet ist und daher nicht mit der folgenden (Nr. 10) verglichen werden kann. Auf diese Drehung folgt zunächst wieder eine kleine Drehung im umgekehrten Sinne des Uhrzeigers, welche von einer reinen Parallelverschiebung nicht sehr verschieden ist, und dann dreht sich der Oberschenkel mit verhältnissmässig grosser Winkelgeschwindigkeit wieder im Sinne des Uhrzeigers. Diese letztere Drehung dauert genau bis zu dem Moment, in welchem das andere Bein sich auf den Boden aufsetzt. In der nun noch folgenden Periode des gleichzeitigen Aufstehens beider Beine führt endlich der Oberschenkel wieder eine Drehung im umgekehrten Sinne des Uhrzeigers aus. Daraus geht hervor, dass der Oberschenkel eines jeden Beines den grössten Winkel nach hinten mit der Verticalen bildet, während das Bein selbst auf dem Fussboden aufsteht und das andere Bein sich gerade auch auf den Boden aufsetzt. Wie weiter oben erwähnt wurde, ist dagegen der Winkel, den der Oberschenkel mit der Verticalen nach vorn bildet, in dem Moment am grössten, in welchem das eigene Bein sich selbst auf den Boden aufsetzt.

Der Unterschenkel dreht sich während der Periode des Aufstehens des Beines von Anfang bis zu Ende in demselben Sinne, nämlich in der Richtung des Uhrzeigers. Diese Drehung geht im Anfang ziemlich rasch von Statten, so dass der beim Aufsetzen weit nach vorn von der Verticalen abweichende Unterschenkel schon vertical steht, wenn sich der Fuss mit ganzer Sohle auf den Boden aufstellt. Die Drehung ist verhältnissmässig langsam in dem Zeitraum, in welchem der Fuss mit der ganzen Sohle auf dem Boden aufsteht, und sie nimmt zuletzt, während der Abwickelung des Fusses vom Boden, wieder ziemlich grosse Geschwindigkeit an.

Das ungleichmässige Verhalten der beiden oberen Abschnitte des Beines hat nun Bewegungen im Kniegelenk im Gefolge. Zunächst wird im Anfang der Periode des Aufstehens die Beugung des Kniegelenkes, welche die Periode des Schwingens beschloss, fortgesetzt, und zwar genau bis zu dem Moment, in welchem der Fuss sich mit der ganzen Sohle auf den Boden aufstellt. Dies folgt ohne Weiteres daraus, dass der Unterschenkel sich bis zu diesem Moment ziemlich schnell im Sinne des Uhrzeigers dreht,

während der Oberschenkel ganz zuerst sich zwar auch in diesem Sinne bewegt, aber mit weit geringerer Geschwindigkeit, dann aber sogar die entgegengesetzte Drehung annimmt. Während der Periode des Aufstehens des Fusses mit der ganzen Sohle findet nun Streckung des Kniegelenkes statt, weil beide Körpertheile sich in diesem Zeitraum in demselben Sinne drehen, der Oberschenkel aber jetzt schneller als der Unterschenkel. Endlich ist das Abwickeln des Fusses vom Boden wieder von einer sehr ausgesprochenen Beugung des Kniegelenkes begleitet, weil dabei der Oberschenkel sich zu Anfang zwar noch in demselben Sinne wie der Unterschenkel dreht, aber langsamer, zuletzt aber, in der Periode des gleichzeitigen Aufstehens beider Beine, sich sogar im entgegengesetzten Sinne bewegt.

Die genaue Bewegung des Fusses während der Periode des Aufstehens lässt sich aus der Darstellung auf Tafel I nicht deutlich genug erkennen, denn die einzelnen Bewegungsphasen überdecken sich gegenseitig zu sehr, und der Maassstab der Zeichnung ist zu klein. Da nun aber gerade das Verhalten des Fusses für die Hervorbringung der Bewegung des ganzen Beines in der Periode des Aufstehens von entscheidender Bedeutung ist, während in der Periode des Schwingens der Fuss nur eine passive Rolle spielte, so ist die Bewegung des rechten Fusses während des Aufstehens auf den Tafeln II, III und IV für die drei Versuche noch in besonderer Weise zur Darstellung gekommen. Die drei Tafeln geben die Projection der Bewegung des I. Fussgelenkes, des Fussschwerpunktes und der Fussspitze auf die Gangebene in natürlicher Grösse wieder. Für die Darstellung sind dabei die alten Bewegungsphasen, welche durch die Photographie direct festgelegt waren, und nicht wie auf Tafel I die neu abgeleiteten Phasen, verwendet worden. Nur die beiden die Periode des Aufstehens begrenzenden Phasen, welche den Momenten R und S_r entsprechen, sind, so weit sie nicht mit einer durch die Photographie herausgegriffenen Bewegungsphase übereinstimmten, neu abgeleitet und in die Figuren eingezeichnet worden. Dies ist wenigstens zum Theil der Fall auf Tafel III und IV, während beim I. Versuch, welcher auf Tafel II verzeichnet ist, den Momenten R und S_r die ursprünglichen Phasen Nr. 10 und 25 entsprachen. In den abgeleiteten Begrenzungsphasen finden sich die drei Punkte des Fusses durch unterbrochene Linien verbunden, während bei allen anderen Phasen diese Ver-

bindung durch ununterbrochene Linien hergestellt ist. Endlich sind in den drei Figuren die Bahnen der drei ausgezeichneten Punkte des Fusses durch ebenfalls unterbrochen gezeichnete krumme Linien mit angedeutet worden. Ein Einzeichnen der Knochen, wie es auf Tafel I geschehen ist, wurde unterlassen, weil sonst die Deutlichkeit des Bildes wieder dadurch beeinträchtigt worden wäre. Es ist jedoch nicht schwer, sich aus der Lage der drei Punkte für jede Bewegungsphase die Stellung des Fusses zu vergegenwärtigen. Man hat dabei nur zu beachten, dass der Schwerpunkt des Fusses unter dem dritten Keilbeine, nahe dessen vorderem Rande[1]) zu suchen ist, und dass der als Fussspitze bezeichnete Punkt in Wirklichkeit 3 cm hinter dem vordersten Punkte des Fusses[2]) beim Versuchsindividuum lag.

Auf den drei Tafeln kann man nun ohne Mühe die drei Abschnitte der Periode des Aufstehens auseinanderhalten. Am besten geht dies, wenn man die Bahncurve des Fussschwerpunktes in's Auge fasst. Der Fuss dreht sich bekanntlich zuerst um einen annähernd festen Punkt seiner Hacke; darauf bleibt er längere Zeit nahezu in Ruhe, indem er dabei mit ganzer Sohle auf dem Boden aufsteht; endlich wickelt er sich vom Boden ab. Während er sich um die Hacke dreht, beschreibt sein Schwerpunkt einen deutlich ausgesprochenen Kreisbogen mit der Concavität nach unten und hinten. Nachdem darauf der Fuss sich mit der ganzen Sohle auf den Boden aufgestellt hat, bleibt der Schwerpunkt nahezu fest an seinem Ort bis zu dem Moment, in dem der Fuss beginnt, sich wieder vom Boden abzuwickeln. In diesem letzten Abschnitt der ganzen Periode beschreibt dann der Schwerpunkt des Fusses eine Curve, welche nach unten und vorn concav ist. Diese Curve ist nicht mehr ein reiner Kreisbogen, weil der Punkt, um welchen sich der Fuss dreht, nicht seine Lage beibehält, sondern allmählich immer weiter nach vorn auf der Sohle des Fusses wandert. Die Curve kann vielmehr mit grösserer Annäherung als Stück einer Cycloide aufgefasst werden, welche bekanntlich von einem Punkte beschrieben wird, der mit einem auf einer Geraden rollenden Kreise fest verbunden ist. Während der

1) Vgl. W. BRAUNE u. O. FISCHER, Ueber den Schwerpunkt des menschlichen Körpers. Abhandl. der math.-phys. Classe der Kgl. Sächs. Gesellsch. d. Wissensch. Bd. XV No. VII S. 594.

2) Vgl. Der Gang des Menschen. I. Theil. S. 248. Z. 2 v. u.

Schwerpunkt des Fusses bei der Drehung um die Hacke seine Kreisbahn mit abnehmender Geschwindigkeit durchläuft, wird in der Periode des Abwickelns des Fusses vom Boden seine Bewegung in der Cycloidenbahn immer schneller.

Der Mittelpunkt des I. Fussgelenkes beschreibt im Grossen und Ganzen ähnliche Bahnen wie der Schwerpunkt. Nur ist sowohl der Kreisbogen als auch das Stück der Cycloide einmal etwas gestreckter und dann auch ausgedehnter als bei der Schwerpunktsbahn, weil das Fussgelenk in allen Fällen weiter vom momentanen Drehpunkt entfernt ist. Während des Aufstehens des Fusses mit der ganzen Sohle behält der Fussgelenkmittelpunkt nicht vollkommen seine Lage bei, sondern beschreibt einen, allerdings nur wenige Millimeter messenden Weg von hinten unten nach vorn oben. Auch der Schwerpunkt des Fusses blieb dabei nicht vollkommen fest, wenn auch seine Excursion noch geringer ausfiel. Das hat zum Theil darin seinen Grund, dass der Fuss sich in der Periode des Aufstehens nicht genau wie eine starre Masse verhält, sondern sich etwas unter Inanspruchnahme der Gelenke zwischen den einzelnen Knochen der Fusswurzelreihe deformirt, zum Theil wird es auch eine Folge davon sein, dass die Stelle grössten Druckes an der Fusssohle allmählich nach vorn wandert und eine successive kleine Senkung der vorderen und geringe Erhebung der hinteren Partien des Fusses verursacht.

Die Fussspitze beschreibt ebenfalls während der Drehung des Fusses um die Hacke einen Kreisbogen, der aber infolge der grösseren Entfernung vom Drehpunkte noch gestreckter und ausgedehnter ist wie der des Mittelpunktes vom Fussgelenk. Solange der Fuss mit der ganzen Sohle auf dem Boden aufsteht, bewegt sich die Fussspitze gewissermaassen in Fortsetzung des Kreisbogens noch weiter nach unten um eine Strecke, die nahezu doppelt so lang ist als der gleichzeitig vom Schwerpunkt des Fusses nach oben beschriebene Weg. Der ganze Fuss dreht sich in diesem Zeitraum, wie man übereinstimmend aus allen drei Tafeln erkennt, um einen Punkt der Verbindungslinie des Fussschwerpunktes mit dem als Fussspitze bezeichneten Punkte, welcher doppelt so weit von diesem als von jenem entfernt ist. Während des Abwickelns des Fusses vom Boden endlich beschreibt die Fussspitze wieder ein Stück einer cycloidenähnlichen Curve, welches aber in Folge der grösseren Nähe der Fussspitze an dem nach vorn schreitenden

Centrum der Rollung eine viel geringere Länge besitzt, als die Cycloidenbögen der beiden anderen Punkte des Fusses, und welches ausserdem nicht wie diese von hinten unten nach vorn oben, sondern von hinten oben nach vorn unten und weniger regelmässig verläuft.

Fasst man die Bewegung des Fusses als Ganzes während der Periode des Aufstehens in's Auge, so erkennt man, dass derselbe sich von Anfang bis zu Ende in demselben Sinne, nämlich von der rechten Seite aus gesehen in der Richtung des Uhrzeigers dreht. Diese Drehung ist zu Anfang verhältnissmässig geschwind, sie nimmt aber zunächst fortwährend an Geschwindigkeit ab, bis sie in der Periode des Aufstehens des Fusses mit der ganzen Sohle kaum noch zu merken ist. Während aber der Fuss sich darauf vom Boden abwickelt, steigt die Geschwindigkeit der Drehung wieder sehr schnell an.

Vergleicht man die drei Tafeln II, III und IV mit einander, so lässt sich wieder zwischen den beiden ersten Versuchen eine vollkommene Uebereinstimmung constatiren, wenn man in Rücksicht zieht, dass naturgemäss beim II. Versuch andere Bewegungsphasen durch die Photographie festgelegt sind wie beim ersten. Auch beim III. Versuch, bei dem ja das Versuchsindividuum das schwere Militärgepäck trug, stellen sich die Verhältnisse nur wenig anders wie bei den beiden ersten. Ein kleiner Unterschied ist nur in der Ausdehnung der drei Kreisbögen zu erkennen, welche während der Drehung des Fusses um die Hacke beschrieben werden; dieselbe ist beim III. Versuch etwas geringer als bei den beiden anderen. —

Das Fussgelenk führt in der Periode des Aufstehens in verschiedener Weise Gelenkbewegung aus. Zu Anfang erleidet es in der Projection auf die Gangebene Plantarflexion, da die Drehung des Fusses schneller stattfindet als die gleichsinnige Drehung des Unterschenkels. Diese Plantarflexion dauert jedoch, wie sich später zeigen wird, nur kurze Zeit. Etwa in der Mitte der Periode des gleichzeitigen Aufstehens beider Beine wird sie von der antagonistischen Gelenkbewegung, also Dorsalflexion, abgelöst. Diese Dorsalflexion des Fusses schreitet fort bis in den ersten Theil der Periode des Abwickelns des Fusses vom Boden hinein. Zuletzt macht sie dann endlich einer sehr energischen Plantarflexion Platz, welche bis zum Beginn des Ablösens des Fusses vom Boden anhält. —

Aus der Kenntniss der Bewegungen der einzelnen Abschnitte des Beins lassen sich nun leicht die Bahncurven der verschiedenen Gelenkmittelpunkte ableiten. Man braucht zu diesem Zwecke nur von der oben ausführlich dargelegten Bahn des Mittelpunktes vom I. Fussgelenk in der Periode des Aufstehens des betreffenden Beins auszugehen, dann kann man sich mit Hülfe der Bewegung des Unterschenkels ohne Mühe die Bahncurve des Mittelpunktes vom Kniegelenk verschaffen. Aus dieser letzteren und der Bewegung des Oberschenkels resultirt dann weiter die Bahncurve des Hüftgelenkmittelpunktes in der Periode des Aufstehens. Zieht man ferner die im I. Theil der Untersuchung über den Gang des Menschen ausführlich beschriebenen Drehungen der Hüftlinie[1]) in Betracht, so gelangt man leicht auch zur Bahncurve des anderen Hüftgelenkmittelpunktes. Damit hat man aber, unter der Voraussetzung streng symmetrischen Verhaltens beider Beine, die ganze Gestalt der Curve des Hüftgelenkmittelpunktes während eines Doppelschrittes aufgeklärt, denn in die Periode des Aufstehens des einen Beins fällt die Periode des Schwingens des anderen vollständig hinein; es kommt zu letzterer sogar noch vorher und hinterher je eine Periode des gleichzeitigen Aufstehens beider Beine hinzu, indem im Anfang der Periode des Aufstehens des einen Beins das andere noch kurze Zeit mit dem Boden in Berührung bleibt, und sich andererseits kurz vor Ende dieser Periode schon wieder auf den Boden aufgesetzt hat.

Kennt man nun die Bahn des Hüftgelenkmittelpunktes während des Schwingens des betreffenden Beins, so kann man von derselben ausgehend die Bahncurven des Kniegelenks, I. Fussgelenks und Fussschwerpunktes, bezüglich der Fussspitze, ableiten. So lässt sich das in diese Periode fallende Stück der Kniegelenkbahn auffassen als das Resultat der Bewegung des Hüftgelenkmittelpunktes und der gleichzeitigen Drehung des Oberschenkels. Die Bahncurve des I. Fussgelenks resultirt dann aus der Bahn des Mittelpunktes vom Kniegelenk in Verbindung mit der gleichzeitigen Drehung des Unterschenkels. Und die Bahn des Fussschwerpunktes, bezüglich der Fussspitze, entsteht aus der Bewegung des Mittelpunktes vom I. Fussgelenk und der dieselbe begleitenden Drehung des Fusses im Raume.

---

1) l. c. S. 282.

Die Bahncurve, welche der Mittelpunkt vom I. Fussgelenk während der Periode des Aufstehens des Beins beschreibt, zerfiel in drei deutlich von einander geschiedene Theile, eine Kreisbahn nach vorn und unten, eine nur wenige Millimeter ausgedehnte Kreisbahn nach oben und eine Cycloidenbahn nach vorn und oben. Die drei Theile entsprechen den drei Abschnitten der Periode des Aufstehens: der Drehung um die Hacke, dem Aufstehen mit ganzer Sohle auf dem Boden und dem Abwickeln des Fusses vom Boden. Würde der Unterschenkel in der Periode des Aufstehens seine Richtung im Raume beibehalten, also eine Parallelbewegung oder Translationsbewegung ausführen, so müsste jeder Punkt desselben, insbesondere der Mittelpunkt des Kniegelenks eine der Bahn des I. Fussgelenkmittelpunktes genau congruente Bahncurve beschreiben. Die Abweichung in der Gestalt beider Bahnen ist daher ausschliesslich Folge der Drehung des Unterschenkels.

Durch die Drehung allein, wenn sie genau parallel der Gangebene stattfände, würde der Mittelpunkt des Kniegelenks in eine Kreisbahn gezwungen sein. Diese Kreisbahn würde aber während der Drehung des Fusses um die Hacke von unten hinten nach vorn oben verlaufen, weil der Unterschenkel im Moment des Aufsetzens des Beins auf den Boden stark nach vorn gegen die Verticale geneigt ist, und erst zu Ende der Drehung um die Hacke gerade in die verticale Stellung übergeführt ist. Da nun die gleichzeitig vom Mittelpunkt des Fussgelenks beschriebene Kreisbahn von hinten oben nach vorn unten verläuft, so wird es verständlich, dass der Mittelpunkt des Kniegelenks, wie man aus Tafel I und noch deutlicher aus den Tafeln X und XI des I. Theils der Untersuchung über den Gang erkennt, sich nahezu horizontal in diesem Zeitraum bewegt. Nur am Ende desselben steigt die Bahn etwas an, weil zuletzt die Bewegung des Fussgelenkmittelpunktes in seiner Kreisbahn sehr langsam, dagegen die Drehung des Unterschenkels noch immer mit einer merklichen Geschwindigkeit vor sich geht.

In der Periode des Aufstehens mit ganzer Fusssohle ist die Bewegung des Fussgelenks gegenüber der Drehung des Unterschenkels so gering, dass sie ganz ausser Betracht gelassen werden kann. Der Mittelpunkt des Kniegelenks beschreibt daher in diesem Zeitraum einen Kreisbogen, der zu Anfang infolge der verticalen

Stellung des Unterschenkels horizontal gerichtet ist, sich aber dann nach vorn und unten neigt. Diese Bahn wird dadurch etwas in ihrer Gestalt modificirt, dass die Drehung des Unterschenkels nicht genau parallel der Gangebene stattfindet. Ihre Ausdehnung ist geringer als die Bahnstrecke, welche der Mittelpunkt des Kniegelenks während der kürzer dauernden Drehung um die Hacken beschreibt; dies hat darin seinen Grund, dass, wie schon oben erwähnt wurde, die Drehung des Unterschenkels während des Aufstehens des Fusses mit ganzer Sohle verhältnissmässig langsam vor sich geht.

In dem letzten Abschnitt der Periode des Aufstehens, in dem sich der Fuss vom Boden abwickelt, beschreibt der Mittelpunkt des Fussgelenks eine Cycloidenbahn von hinten unten nach vorn oben. Gleichzeitig bewegt sich der Mittelpunkt des Kniegelenks relativ zum Fussgelenk infolge der Drehung des Unterschenkels auf einer Kreisbahn, die stark von hinten oben nach vorn unten geneigt ist, weil schon zu Anfang der Unterschenkel merklich gegen die Verticale geneigt ist. Das Resultat ist ähnlich wie im ersten Zeitabschnitt der Periode des Aufstehens. Der Mittelpunkt des Kniegelenks beschreibt unter dem Einfluss der beiden Bewegungen im Grossen und Ganzen eine horizontale Bahn; dieselbe neigt sich erst in der zweiten Hälfte des Zeitraums deutlich unter die Horizontale, weil jetzt die Abwärtsbewegung der zum Fussgelenk relativen Bewegung des Kniegelenks über die Aufwärtsbewegung des Fussgelenks in seiner Cycloidenbahn überwiegt. Die Ausdehnung der Bahncurve in diesem dritten Abschnitt der Periode des Aufstehens ist ungefähr gerade so gross wie die Gesammtausdehnung der beiden Bahncurven, welche während der zwei ersten Abschnitte beschrieben werden.

Der Mittelpunkt des Hüftgelenks bewegt sich beim Gehen bekanntlich in einer doppelt gekrümmten Bahn, die sowohl in der Projection auf die Gangebene als auch in der Projection auf den horizontalen Fussboden die Form einer Wellenlinie besitzt. In der Horizontalprojection stimmt die Wellenlänge mit der Länge eines Doppelschrittes überein. Die Wellenlinie der Projection auf die Gangebene besteht bei jedem Hüftgelenkmittelpunkt innerhalb der Grenzen eines Doppelschrittes aus zwei Wellen, welche weder in ihrer Länge, noch in ihrer Gestalt vollkommen übereinstimmen. Das letztere war nur der Fall für die Bahn der Hüftlinienmitte,

bei welcher demnach die Wellenlänge in der Projection auf die Gangebene gleich der einfachen Schrittlänge, also gerade halb so gross als die Wellenlänge in der Horizontalprojection war. Die Ungleichheit in den beiden Theilen der auf die Gangebene projicirten Wellenlinie für einen Hüftgelenkmittelpunkt folgt aus den Drehungen der Hüftlinie. In der Periode des Aufstehens eines Beins wird etwas über eine Wellenlänge zurückgelegt. Im Moment des Aufsetzens des Beins befindet sich der zugehörige Hüftgelenkmittelpunkt gerade an der tiefsten Stelle eines Wellenthals; etwa in der Mitte der Periode des Aufstehens mit ganzer Fusssohle hat er den höchsten Punkt des folgenden Wellenberges erklommen, und im Moment des Aufsetzens des anderen Beins befindet er sich wieder im tiefsten Punkt eines Wellenthals. In der Periode des gleichzeitigen Aufstehens beider Beine steigt dann der betreffende Hüftgelenkmittelpunkt schon wieder etwas in seiner Wellenlinie an. Alle diese Thatsachen lassen sich aus Tafel I oder auch aus den Tafeln X und XI des I. Theiles leicht nachweisen. Es kommt nun hier darauf an, die Wellenbahn des Hüftgelenkmittelpunktes in der Projection auf die Gangebene zunächst während der Periode des Aufstehens aus der Bewegung des Mittelpunktes vom Kniegelenk und der gleichzeitigen Drehung des Oberschenkels abzuleiten.

Im Moment des Aufsetzens des Beins besitzt der Oberschenkel die grösste Abweichung nach vorn von der Verticalen. Da auch der Unterschenkel nur wenig von seiner maximalen Abweichung von der Verticalen nach vorn entfernt ist, so wird es verständlich, dass in diesem Moment der Mittelpunkt des Hüftgelenks sich an seiner tiefsten Stelle befindet. Während der Drehung des Fusses um die Hacke beschrieb der Mittelpunkt des Kniegelenks eine zuerst horizontal verlaufende, dann etwas ansteigende Linie. Da in dieser Periode der Oberschenkel nur geringe Drehungen ausführt und daher sich nahezu parallel fortbewegt, so kann die Bahn des Hüftgelenkmittelpunktes nicht sehr von dieser Curve des Kniegelenks abweichen. So entsteht das erste Stück des ansteigenden Theiles der Wellenlinie bis etwa zum ansteigenden Knotenpunkt derselben. In dem Zeitraum des Aufstehens des Fusses mit der ganzen Sohle beschreibt das Kniegelenk einen nicht sehr ausgedehnten Kreisbogen. Der Oberschenkel dreht sich dabei im Sinne des Uhrzeigers aus einer mit dem Hüftende stark

nach hinten geneigten Stellung bis in eine nach vorn geneigte Lage. Bliebe das Kniegelenk an seinem Ort im Raume, so würde der Mittelpunkt des Hüftgelenks einen Kreisbogen beschreiben. Infolge der gleichzeitigen Bewegung des Kniegelenks nach vorn wird dieser Kreisbogen mehr in die Länge gezogen, und es entsteht der auf das Wellenthal folgende Wellenberg. In dem nun folgenden Zeitraum des Abwickelns des Fusses dreht sich der Oberschenkel zunächst noch in demselben Sinne weiter, aber mit immer mehr abnehmender Winkelgeschwindigkeit, bis diese Drehung im Moment des Aufsetzens des anderen Beins aufhört, um der entgegengesetzten Drehung Platz zu machen. Gleichzeitig bewegt sich das Kniegelenk nahezu horizontal fort. Daher beschreibt der Mittelpunkt des Hüftgelenks eine Linie nach abwärts, welche an Steilheit immer mehr abnimmt und zuletzt, d. h. im Moment des Aufsetzens des anderen Beins wie die Curve des Kniegelenks horizontal gerichtet ist. Damit ist wiederum die tiefste Stelle des folgenden Wellenthales erreicht worden. In dem noch fehlenden Zeitabschnitt der Periode des Abwickelns des Fusses vom Boden, welcher zusammenfällt mit der Periode des gleichzeitigen Aufstehens beider Beine, dreht sich nun der Oberschenkel im entgegengesetzten Sinne. Da er zuletzt stark mit dem oberen Ende nach vorn geneigt war, so muss diese Drehung eine Erhebung des Hüftgelenks zur Folge haben, welche durch die kleine Senkung in der gleichzeitigen Bahn des Kniegelenks nicht vernichtet werden kann. Dies ist denn auch thatsächlich der Fall, und es entsteht wieder das auf den tiefsten Punkt folgende Stück des Wellenthales, welches allerdings sich nicht bis zum nächsten aufsteigenden Knotenpunkt der Wellenlinie erstreckt.

Aus der Bahn des Hüftgelenkmittelpunktes in der Periode des Aufstehens des gleichseitigen Beins lässt sich nun unter Berücksichtigung der Drehungen der Hüftlinie, d. h. also der Verbindungslinie der beiden Hüftgelenkmittelpunkte, leicht die Bahncurve ableiten, welche der Hüftgelenkmittelpunkt des anderen Beins beschreibt. Dies ist im I. Theil schon auseinander gesetzt worden, so dass es nicht nöthig ist, noch einmal ausführlich an dieser Stelle darauf einzugehen. Es soll hier nur hervorgehoben werden, dass die Abweichungen in der Gestalt der beiden gleichzeitig beschriebenen Hüftbahnen nicht sehr beträchtlich sind, weil die Excursionen, welche ein jedes Hüftgelenk in den Richtungen der drei

Coordinatenaxen (Gangrichtung, Seitenrichtung und verticale Richtung) im Raume ausführt, sehr viel grösser sind als die Bewegung eines jeden Hüftgelenks relativ zum anderen. Am meisten Einfluss auf die Abweichungen der beiden Hüftbahnen besitzt noch die Bewegung der Hüftlinie parallel der Horizontalebene, also die Drehung derselben um die verticale Axe. Im Moment des Aufsetzens eines Beins ist die Hüftlinie auf dieser Seite stark nach vorn gedreht, so dass der Hüftgelenkmittelpunkt der anderen Seite relativ zurückgeblieben ist. Das Umgekehrte findet natürlich statt, wenn das andere Bein sich vorn auf den Boden aufsetzt. Daraus folgt aber ohne Weiteres, dass der Theil der Hüftbahn, welcher zwischen dem Moment des Aufsetzens des einen und dem des Aufsetzens des anderen Beins liegt, auf der Seite desjenigen Beins mehr in die Länge gestreckt erscheint, welches in diesem Zeitraum seine Schwingung ausführt. Dies lässt sich auch leicht auf Tafel I erkennen. Denn zwischen *R* und *L* ist die Wellenbahn des linken (rothen) Hüftgelenkes länger als die des rechten.

In die Periode des Schwingens fällt nicht ganz ein zwischen zwei aufeinanderfolgenden tiefsten Stellen der Wellenthäler sich erstreckendes Stück der Wellenlinie, sondern es geht davon ab das Anfangsstück, welches der Periode des gleichzeitigen Aufstehens beider Beine entspricht.

Aus der Gestalt der Hüftbahn in der Periode des Schwingens kann man nun weiter die Bahncurve des Kniegelenks in dieser Periode bestimmen, wenn man die gleichzeitige Drehung des Oberschenkels in Rücksicht zieht. Zu Anfang ist der Oberschenkel mit seinem unteren Ende nach hinten gegen die Verticale geneigt. Da er sich zunächst von der rechten Seite aus gesehen in der umgekehrten Richtung des Uhrzeigers dreht, so wird das Kniegelenk sich relativ zum Hüftgelenk im Anfang in einer nach vorn und abwärts gerichteten Kreisbahn bewegen. Da gleichzeitig das Hüftgelenk zunächst nur wenig in seiner Wellenbahn ansteigt, so wird demnach der Mittelpunkt des Kniegelenkes seine zuletzt während des Abwickelns des Fusses vom Boden nach vorn und etwas nach abwärts gerichtete Bewegung noch kurze Zeit fortsetzen. Der Umstand, dass der Oberschenkel bald die verticale Stellung passirt und die Drehung in der umgekehrten Richtung des Uhrzeigers während der ersten beiden Drittel der Periode des Schwingens fortsetzt, während gleichzeitig das Hüftgelenk sich in

der ersten Hälfte dieser Periode nach vorn und oben bewegt, bringt es mit sich, dass das Kniegelenk in seiner Bahn sehr bald den tiefsten Punkt erreicht und sich dann aufwärts bewegt. Diese Aufwärtsbewegung wird auch noch einige Zeit fortgesetzt, nachdem das Hüftgelenk den höchsten Punkt seines Wellenberges passirt hat, weil die noch immer andauernde Drehung des Oberschenkels in demselben Sinne das Kniegelenk mehr erhebt relativ zum Hüftgelenk, als das letztere gleichzeitig gesenkt wird. Schliesslich gleichen sich aber beide Momente aus, so dass nunmehr der Mittelpunkt des Kniegelenks seinen höchsten Stand erreicht hat. Der darauf folgende Theil der Bahn des Kniegelenkmittelpunktes ist nicht sehr verschieden von dem entsprechenden Stück der Hüftgelenkbahn, weil der Oberschenkel in dieser Zeit nur noch geringe Drehungen im einen und anderen Sinne ausführt, so dass er sich nahezu parallel fortbewegt. Die kurze Rückwärtsdrehung des Oberschenkels, welche oben beschrieben worden ist, hat nur zur Folge, dass der Mittelpunkt des Kniegelenkes noch etwas vor dem Aufsetzen des Beines seinen tiefsten Stand erreicht, während der Mittelpunkt des Hüftgelenkes genau in dem Moment des Aufsetzens die geringste Höhe über dem Fussboden besass.

Alles in Allem genommen kann man sagen, dass die Bahncurve, welche der Mittelpunkt des Kniegelenkes während der Periode des Schwingens des zugehörigen Beines beschreibt, die Gestalt einer in der Gangrichtung verzerrten Wellenlinie besitzt.

Die Bahn des Mittelpunktes vom I. Fussgelenk verhält sich in der Periode des Schwingens annähernd gerade umgekehrt wie die gleichzeitig beschriebene Bahn des zugehörigen Hüftgelenkmittelpunktes. Wo diese ein Maximum besitzt, befindet sich jene in der Nähe eines Minimums, und umgekehrt. Dieses entgegengesetzte Verhalten der beiden Bahncurven ist ausschliesslich Folge der Drehungen des Oberschenkels und Unterschenkels.

Im Anfang befindet sich die Hüftbahn in einem Minimum, die Kniebahn bewegt sich nahezu horizontal, nur wenig abwärts, die Bahn des I. Fussgelenks steigt dagegen zunächst in Fortsetzung der Cycloidenbahn am Ende der Periode des Aufstehens etwas an, infolge der noch kurze Zeit andauernden Rückwärtsdrehung des Unterschenkels, erreicht aber bald ihren höchsten

Punkt. Der Unterschenkel bildet dabei annähernd den grössten Winkel nach hinten mit der Verticalen. Während der nun folgenden Vorwärtsdrehung des Unterschenkels beschreibt der Mittelpunkt des I. Fussgelenkes eine stetig abfallende Bahn trotz des gleichzeitigen Ansteigens des Kniegelenks, weil die Senkung infolge der Drehung des Unterschenkels relativ zum Kniegelenk stärker ist als die sie begleitende Erhebung des Kniegelenks. Ungefähr in dem Moment, in dem der Unterschenkel vertical steht, hat das Fussgelenk seinen tiefsten Stand erreicht. Dies trifft aber nahezu zusammen mit der höchsten Erhebung des Kniegelenkes, und ist zeitlich nur wenig von dem letzten Maximum der Hüftbahn entfernt. Die Bahn des Kniegelenks fällt nun wieder ab, aber der Unterschenkel dreht sich mit verhältnissmässig grosser Geschwindigkeit weiter nach vorn. Daher ergibt sich als Resultat für das Fussgelenk eine, wenn auch nur sanft ansteigende Erhebung der Bahncurve; dieselbe hält solange an, als der Unterschenkel sich noch in demselben Sinne weiter dreht. Kurz vor dem Aufsetzen des Beins kehrt der Unterschenkel den Sinn seiner Drehung um und bewegt sich bis zuletzt, von der rechten Seite aus gesehen, im Sinne des Uhrzeigers. Diese Schlussdrehung hat eine Abwärtsbewegung des Mittelpunktes vom I. Fussgelenk zur Folge, weil das Kniegelenk sich dabei nur wenig erhebt. So ergibt sich denn kurz vor dem Aufsetzen des Fusses auf den Boden ein weiteres Maximum in der Bahn des Mittelpunktes vom I. Fussgelenk, während die Hüftbahn im Moment des Aufsetzens gerade ein Minimum zeigte. —

Damit ist im Grossen und Ganzen ein Ueberblick über die Bewegung der einzelnen Abschnitte der Beine, die Gestaltsänderungen derselben und das Zustandekommen der charakteristischen Bahncurven der Gelenkmittelpunkte gegeben, welcher später dazu beitragen wird, das Verständniss für die weiteren Details im Verhalten der unteren Extremitäten beim Gehen zu erleichtern. Dieser vorläufige Ueberblick kann indessen durchaus noch kein vollkommenes Bild von der Bewegung der Beine liefern, da er sich ja nur mit der Ansicht von der Seite oder, mit anderen Worten, mit der Projection des Bewegungsvorganges auf die Gangebene beschäftigt hat.

Bevor auf das genauere Studium dieser Verhältnisse eingegangen werden soll, wird es von Interesse sein, die in der

Kritik der Beschreibung der Beinbewegungen, welche die Brüder Weber in ihrer Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge gegeben haben.

Auf der rechten Seite von Tafel I findet sich eine getreue Copie der Figur 3 auf Tafel XII der Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge vor. Es sind nur die beiden Theile der Figur, welche die Stellungen des Beines in der Periode des Aufstehens und des Schwingens desselben veranschaulichen sollen, mit einander vertauscht, damit man bequemer den Vergleich mit der darüber befindlichen Darstellung der Bewegungsphasen auf der linken Seite von Tafel I anstellen kann. Daher ist auch die von den Brüdern Weber vorgenommene Numerirung der aufeinanderfolgenden Phasen fortgelassen worden.

Schon ein flüchtiger Vergleich zeigt nun allerdings, dass die Darstellung der Brüder Weber nur in geringem Maasse den thatsächlichen Verhältnissen entspricht. Es würde auch ein Wunder sein, wenn es anders wäre; denn den beiden Forschern standen ja nur wenige empirische Daten über das Verhalten der Beine beim Gehen zur Verfügung. Ausser einigen Messungen über die Schrittlänge, über die Beinlänge bei verschiedener Streckung, die Länge des gestreckten hinteren Beines bei verschiedenen Geschwindigkeiten des Gehens, die Hebung der Füsse beim Gehen, der Höhe, in welcher sich die Femurköpfe über dem Fussboden beim Gehen befinden und der Grösse der verticalen Schwankungen derselben, der Schrittdauer, der Dauer der Schwingung und der Zeit des Aufstehens eines Beines u. a. waren sie durchaus auf theoretische Gesichtspunkte angewiesen. Ebensowenig wie man erwarten konnte, dass die Ansichten mit den Thatsachen genau übereinstimmten, welche sich Anatomen auf Grund gewisser Eigenschaften über die Structur bestimmter Gewebe gebildet hatten, bevor das Mikroskop es der histologischen Forschung ermöglichte, die Bauelemente

direct zu sehen, ebensowenig konnte man erwarten, dass die Ansichten der Wirklichkeit genau entsprachen, welche sich die Brüder Weber auf Grund der wenigen Daten, die sie durch directe Messung gewinnen konnten, über die successiven Stellungen der Beine gebildet hatten, bevor die Momentphotographie es der Forschung auf dem Gebiete der Bewegungsphysiologie ermöglichte, die einzelnen Bewegungsphasen direct zu fixiren. Sie mussten sich damit begnügen, eine Hypothese aufzustellen, welche sich mit den Resultaten ihrer Messungen in Uebereinstimmung befand. Und da ist es immerhin erstaunlich, dass sie trotz ihrer geringen Hülfsmittel für die Erforschung des complicirten Bewegungsvorganges doch so manche Thatsache richtig aufgedeckt haben. Es kann daher durch den Umstand, dass sich vieles in der Weber'schen Darstellung des ganzen Bewegungsvorganges mit Hülfe der Momentphotographie nicht bestätigen lässt, nicht im Geringsten die Bedeutung der Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge als eines klassischen Werkes, welches den ersten Versuch einer exacten Forschung auf dem Gebiete der Bewegungsphysiologie darstellt, herabgesetzt werden.

Bei der Vergleichung der beiden Figurenreihen auf Tafel I springt zunächst in die Augen, dass die Brüder Weber sich eine ganz falsche Vorstellung über das Verhalten des Unterschenkels gebildet hatten. Bei ihnen führt derselbe nur verhältnissmässig geringe Drehungen aus und ist vor allen Dingen stets, insbesondere auch im Moment des Aufsetzens des Beines, nach rückwärts gegen die Verticale geneigt, während doch in Wirklichkeit sich das Bein mit stark nach vorn ausgestrecktem Unterschenkel auf den Boden aufsetzt. Zu der verfehlten Anschauung über die Stellungen des Unterschenkels sind die Brüder Weber durch eine andere Annahme geführt worden, die sie aus theoretischen Gründen über die Einwirkung der Kräfte auf den Körper machen zu müssen glaubten.

Sie hielten es nämlich für absolut nothwendig, dass in demselben Moment, in welchem ein Bein seine Schwingung beginnt, das andere vertical steht (§ 121), wobei sie unter verticaler Lage des Beines diejenige verstehen, bei welcher die durch den Mittelpunkt des Femurkopfes gelegte Verticallinie den Punkt trifft, in dem der Fuss sich gegen den Boden stemmt (vgl. die Anmerkung zu § 8). Die Erfüllung dieser Bedingung erachteten sie im Inter-

esse des regelmässigen Ganges für so wichtig, dass sie dieselbe zu einer der drei Grundlagen ihrer Theorie des Gehens unter dem Namen „Princip der anfänglichen Stellung“ (§ 125) gemacht haben. Das Princip der anfänglichen Stellung ist nun beim Gehen, sofern es sich nicht etwa um den allerersten Schritt handelt, auch nicht annähernd erfüllt. Man braucht sich nur die Darstellung auf der linken Seite von Tafel I, oder auf den Tafeln X und XI des I. Theiles, oder irgend eine der zahlreichen MAREY'schen, MUYBRIDGE'schen oder ANSCHÜTZ'schen Serien von Momentbildern des gehenden Menschen daraufhin anzusehen, um zu erkennen, dass in dem Augenblicke, in dem das hintere Bein den Boden verlässt, das vordere Bein durchaus nicht vertical auf dem Boden steht, sondern vielmehr sehr weit nach vorn ausgestreckt ist. Die Verticale durch den Mittelpunkt des Femurkopfes vom vorderen Bein geht weit nach hinten an dem Fuss vorbei; sie trifft den Boden in einem Punkte, welcher sogar noch weiter hinter der Fussspitze des vorderen liegt, als er nach vorn von der Fussspitze des sich eben in Schwingung setzenden hinteren Beines entfernt ist. Unter diesen Umständen kann natürlich selbst von einer nur angenäherten Gültigkeit des WEBER'schen Princips der anfänglichen Stellung keine Rede sein. Damit fällt aber einer der drei Grundpfeiler für die WEBER'sche Theorie des Gehens in sich zusammen.

Da das Aufsetzen eines Beins zeitlich kurz vor dem Anfang der Schwingung des anderen Beins liegt, so durfte infolge des Princips der anfänglichen Stellung das Bein schon beim Aufsetzen nur wenig von der verticalen Lage entfernt sein. Aus den Messungen über die Höhe, in welcher der Schenkelkopf über dem Fussboden beim Gehen getragen wird, folgte für die Brüder WEBER weiter, dass die verticale Stellung des Beins mit starker Beugung im Kniegelenk verbunden sein musste; und so kommen sie zu der falschen Anschauung über die Stellung des Unterschenkels im Moment des Aufsetzens und über die Haltung desselben während des vorausgehenden Schwingens des Beins.

Die fehlerhafte Stellung des Unterschenkels zu Anfang der Periode des Aufstehens scheint die Brüder WEBER weiter zu einer falschen Annahme über das gleichzeitige Verhalten des Fusses geführt zu haben. Bei ihrer Darstellung setzt sich nämlich der Fuss gleich mit der ganzen Sohle auf den Boden, während doch in Wirklichkeit, wie an jedem normal gehenden Menschen leicht

zu beobachten ist, zuerst nur die Hacke aufgesetzt wird, und die Fussspitze dabei stark erhoben ist. Eine solche Anfangsstellung des Fusses ist aber für den Fall, dass der Unterschenkel schon so weit mit dem oberen Ende nach vorn geneigt ist, wie es die Brüder Weber für den Moment des Aufsetzens annahmen, infolge der Grenzen, welche der Dorsalflexion des Fusses gesetzt sind, nicht möglich. Daher sahen sich jedenfalls die Brüder Weber veranlasst, den Fuss in ihrer Darstellung gleich mit der ganzen Sohle auf den Boden aufzusetzen.

Eine weitere Quelle von Fehlern resultirte aus der Ansicht der Brüder Weber über den Verlauf der von ihnen direct beobachteten und in ihrer Ausdehnung gemessenen verticalen Schwankungen. Sie nahmen an (§ 24), dass die Abwärtsbewegung des Rumpfes und der Schenkelköpfe bei jedem Schritte unmittelbar vor dem Augenblicke stattfindet, in dem ein Bein vertical zu stehen kommt, die darauf folgende Aufwärtsbewegung aber in diesem Augenblicke selbst, wie es auch in der Weber'schen Figur auf Tafel I in der zur Periode des Aufstehens gehörenden Gruppe zur Darstellung gekommen ist. Im Uebrigen nahmen sie an, dass die Schenkelköpfe sich immer in ein- und derselben Horizontalebene bewegen. Dies entspricht nun den Thatsachen keineswegs. Denn das Hüftgelenk bewegt sich von dem Moment des Aufsetzens an, wo das Bein, wie oben auseinandergesetzt wurde, noch sehr weit von der verticalen Stellung entfernt ist, stetig aufwärts und hat in dem Augenblick, in dem das Bein vertical steht, schon seine grösste Höhe erreicht. Von da an geht die Bewegung wieder stetig abwärts bis kurz vor dem Moment, in dem das Bein seine Schwingung beginnt. Während der Schwingung bewegt sich dann das Hüftgelenk zunächst wieder nach oben bis etwa in die Mitte der Periode des Schwingens, wo der Schwerpunkt des Fusses sich vertical unter dem Hüftgelenk vorbei bewegt, und darauf fällt es stetig wieder nach unten bis zum Moment des Aufsetzens. Abgesehen von den früher beschriebenen verticalen Schwankungen der Hüftlinie, welche im Vergleich zu der Auf- und Abwärtsbewegung der Hüftgelenke nur gering sind, macht das andere Hüftgelenk und infolgedessen auch der Rumpf diese Bewegungen mit.

Aus ihrer Ansicht, dass die Schenkelköpfe fast in gerader Linie fortbewegt werden müssten (§ 92), und höchstens kurz vor der verticalen Stellung des aufgesetzten Beins etwas fallen könnten

(§ 121), weil das Bein, indem es zur verticalen Lage komme, den Oberkörper ohne störenden Einfluss auf die horizontale Fortbewegung sogleich wieder zur früheren Höhe zurückführen könne, leiteten die Brüder WEBER ein zweites Grundprincip für das Zustandekommen des Ganges ab. Sie folgerten nämlich hieraus (§ 92), „dass die den menschlichen Körper beim Gehen unterstützende und fortbewegende Streckkraft des stemmenden Beins auf eine solche Weise wirken müsse, dass, ungeachtet sich die Stellung des Beins ändere, doch seine Streckkraft, nach verticaler Richtung geschätzt, der Schwerkraft des Körpers nahe gleich sei, so dass dieser weder beträchtlich herabfallen, noch in die Höhe steigen könne." Sie nannten diese Bedingung das „Princip des Maasses der Anstrengung" (§ 125). In dem II. Theil der vorliegenden Untersuchung über den Gang des Menschen ist nun diese verticale Componente der Streckkraft des Beins, welche sich in dem normalen Druck gegen den Fussboden äussert, aus den verticalen Beschleunigungen des Gesammtschwerpunktes abgeleitet worden. Die Resultate dieser Untersuchung finden sich dort für die drei Versuche in den Tabellen 17 und 18 auf S. 124 u. 125 niedergelegt. Das Gewicht des Körpers betrug für die beiden ersten Versuche 58,7 kg. Aus der Tabelle 18 geht aber hervor, dass der normale Druck gegen den Fussboden sich zwischen den Grenzen von abgerundet 15 kg und 82 kg bewegt. Beim III. Versuch war das Gewicht des Körpers infolge der Belastung durch das Militärgepäck auf abgerundet 82 kg gesteigert; in diesem Falle betrugen die äussersten Grenzen für den normalen Druck gegen den Boden abgerundet 39 kg und 123 kg. Man sieht also, dass in beiden Fällen der normale Druck oder, mit anderen Worten, die vertikale Componente der Streckkraft des Beins im Verlaufe eines Doppelschrittes einerseits bis unter die Hälfte der Schwerkraft des Körpers heruntersinkt, und auf der anderen Seite ca. um die Hälfte der Schwerkraft über dieselbe hinaus anwächst. Daraus geht aber hervor, dass auch das WEBER'sche Princip des Maasses der Anstrengung nicht aufrecht erhalten werden kann.

Schliesslich kann man sich davon überzeugen, dass auch das dritte Princip, welches den Brüdern WEBER zur Grundlage ihrer Theorie des Gehens gedient hat, das sie als „Princip der Richtung der Streckung" (§ 125) bezeichnen, keine strenge Geltung hat. Dieses Princip behauptet, dass die Richtung der Streckkraft

immer durch den Mittelpunkt (Gesammtschwerpunkt) des Körpers und den Fusspunkt des stemmenden Beins geht. Mit anderen Worten würde das Princip aussagen, dass die Richtung des Druckes, den wir mit unseren Beinen gegen den Boden ausüben, nach rückwärts verlängert, immer durch den Gesammtschwerpunkt des Körpers hindurchgeht. Die in die Gangrichtung und Seitenrichtung fallenden Componenten dieses Druckes sind aus Tabelle 16 (S. 123), und die verticale Componente, wie oben schon angeführt, aus Tabelle 17 (S. 124) des II. Theiles für jede der 31 Bewegungsphasen abzulesen. Man hat nur die sämmtlichen in diesen Tabellen angegebenen Vorzeichen in ihr Gegentheil umzukehren, wie im letzten Abschnitt auf S. 126 des II. Theiles auseinandergesetzt worden ist. Eine ausführliche Untersuchung, auf welche hier vorläufig nicht näher eingegangen werden kann, ergibt nun, dass die Resultante aus diesen drei Componenten keineswegs immer durch den Gesammtschwerpunkt des Körpers hindurchgeht.

So zeigt sich denn, dass alle drei Grundpfeiler, auf welche die Brüder Weber ihre Theorie des Gehens aufbauten, nicht genügend fundirt waren, um auf ihnen ein Gebäude von ewiger Dauer errichten zu können. Die Weber'sche Theorie ist daher heute nicht mehr mit den Thatsachen, welche die Momentphotographie aufgedeckt hat, in Uebereinstimmung zu bringen. Sie entspricht einem idealen Falle, der sich beim Menschen nicht verwirklicht findet, indem sie nicht, wie es den thatsächlichen Verhältnissen entspricht, eine theils beschleunigte, theils verzögerte Bewegung des Gesammtschwerpunktes auf doppelt gekrümmter Bahn, sondern eine gleichförmige Bewegung desselben in constanter horizontaler Richtung voraussetzt. Unter der Annahme solcher idealer Verhältnisse stellt sie aber ein Muster von exacter Behandlung eines Naturvorganges dar. Sie wird daher immerhin als Vorbild für jede andere Theorie des Gehens dienen können, welche sich auf den inzwischen gewonnenen Thatsachen aufbaut.

Zum besseren Verständniss der neuen Ergebnisse für den Wechsel der Haltungen der Beine beim Gehen wird es von Vortheil sein, unter Bezugnahme auf die Weber'sche Darstellung noch einige abweichende Einzelheiten hervorzuheben.

Die Brüder Weber geben an (§ 8), dass das auf dem Boden stehende Bein in dem Augenblick am meisten verkürzt ist, in

welchem der Mittelpunkt des Schenkelkopfes sich senkrecht über der Ferse befindet. Dies stimmt nur annähernd, denn das Kniegelenk ist in der Periode des Aufstehens in dem Moment am meisten gebeugt, in dem sich der Fuss mit der ganzen Sohle auf den Boden aufsetzt, wie oben auseinandergesetzt worden ist. In dieser Stellung geht aber, wie man aus Tafel I erkennt, die Verticale durch den Mittelpunkt des Hüftgelenks noch hinter dem aufgesetzten Fuss vorbei. Das Kniegelenk beginnt nun schon von hier an seine Streckung, während die Brüder WEBER annahmen (§ 14), dass dies erst geschieht, wenn der Rumpf so weit vorgerückt ist, dass der Theil des Fusses, mit dem sich das Bein auf den Boden stützt, hinter der Verticalen des Schenkelkopfs liegt. Weiterhin behaupten die Brüder WEBER (§ 14), dass nun das Bein seine Streckung im Kniegelenk bis zum Ende der Periode des Aufstehens fortsetzt. Dies widerspricht der weiter oben hervorgehobenen Thatsache, dass das Kniegelenk in dem ganzen Zeitraum des Abwickelns des Fusses vom Boden wieder stetig gebeugt wird, so dass das Bein mit der stärksten Beugestellung des Kniegelenks den Boden verlässt, welche überhaupt in der Periode des Aufstehens vorkommt.

Für die Periode des Schwingens nehmen die Brüder WEBER an (§ 17), dass das Kniegelenk zunächst während des grössten Theils dieses Zeitraums gebeugt und erst dann gestreckt wird, wenn der Zeitpunkt kommt, wo die Schwingung endigt und das Bein auf den Boden gesetzt werden soll. „Wir verlängern es dann, indem wir das Bein im Knie so lange strecken, bis es den Fussboden berührt." In Wirklichkeit verhält es sich aber so, dass das Kniegelenk im Anfang nur kurze Zeit gebeugt, während des grössten Theiles des Zeitraums des Schwingens aber gestreckt, und schliesslich am Ende bis zu dem Moment des Aufsetzens des Beins auf den Boden gerade wieder gebeugt wird.

Ableitung der Winkelcoordinaten für die Abschnitte der unteren Extremitäten.

Die bisherigen Betrachtungen haben einen orientirenden Ueberblick über den Wechsel der Stellungen eines jeden Beins im Verlauf eines Doppelschrittes ergeben. Für die weitere Untersuchung ist es nun nöthig, die successiven Stellungen der Beine durch genauere Angaben festzulegen, damit man in der Lage ist, die von ihnen abhängenden Drehungsmomente der Schwere und die Drehungsmomente der Muskeln bis auf die vorläufig noch unbekannten physiologischen Factoren zu berechnen, und die Winkelgeschwindigkeiten und Winkelbeschleunigungen der Drehungen der einzelnen Körpertheile abzuleiten.

Die Stellung eines jeden Körpertheils ist allerdings schon für sämmtliche Bewegungsphasen durch die im I. Theil niedergelegten rechtwinkligen Coordinaten aller an ihm befindlichen Gelenkmittelpunkte festgelegt. Die weiter oben angegebenen Relationen zwischen den Bewegungen der Körpertheile und den an ihnen angreifenden Kräften, welche die Grundlage für die weitere Untersuchung bilden sollen, befassen sich fast ausschliesslich mit den Drehungen der Körpertheile. Es würde nun die Untersuchung nur unnöthig erschweren und compliciren, wenn man für die Bestimmung der Winkelgeschwindigkeiten und Winkelbeschleunigungen ausschliesslich die rechtwinkligen Coordinaten der Gelenkmittelpunkte verwenden wollte. Es empfiehlt sich vielmehr, zu diesem Zwecke Winkel einzuführen, welche speciell für die Theile der unteren Extremitäten die Richtung der Längsaxe eines jeden eindeutig festlegen. Durch die Richtungen der Längsaxen der sämmtlichen Abschnitte eines Beins ist aber im Allgemeinen die Haltung des ganzen Beins schon vollkommen bestimmt, weil die Orientirung eines jeden Theils um seine Längsaxe in der Regel durch die Richtung der Längsaxen der Nachbar-

LANE MEDICAL

glieder gegeben ist. Diese Winkelcoordinaten, wie man sie nennen kann, müssen sich natürlich mit Hülfe der rechtwinkligen Coordinaten berechnen lassen, da ja durch die letzteren die Richtung der Längsaxe eines Körpertheils eindeutig festgelegt ist. Die Einführung der Winkelcoordinaten bietet aber den grossen Vortheil, dass man zur Bestimmung der Richtung der Längsaxe eines Beinabschnittes nur zwei von einander unabhängige Winkel nöthig hat, während dieselbe unter Verwendung der rechtwinkligen Coordinaten im Allgemeinen sechs Coordinaten, nämlich drei für jeden Gelenkmittelpunkt, erfordern würde.

Es lassen sich verschiedene Paare von Winkeln für den angedeuteten Zweck herausgreifen. So kann man die Winkel verwenden, welche die Projection der betreffenden Längsaxe auf zwei verschiedene Ebenen mit Geraden dieser Ebenen bilden. Man kann z. B. die Längsaxe sowohl auf die Gangebene als auch auf die zur Gangrichtung senkrechte Ebene projiciren und dann für beide Projectionen den Winkel messen, den sie mit der verticalen Richtung bilden. Es lassen sich aber auch zwei von einander unabhängige Winkelcoordinaten auf die Weise erhalten, dass man einerseits den Winkel bestimmt, welchen die Längsaxe selbst mit der verticalen Richtung des Raumes bildet, und andererseits die Winkelabweichung der durch die Längsaxe gehenden Verticalebene von der ebenfalls verticalen Gangebene feststellt. Da beide Methoden ihre besonderen Vorzüge darbieten, so sollen sie auch beide im Folgenden zur Verwendung kommen.

Zur Ableitung der Winkel denke man sich die betreffende Längsaxe mit dem Mittelpunkt ihres proximalen Gelenkes unter Beibehaltung ihrer Richtung nach dem Anfangspunkt eines rechtwinkligen Coordinatensystems verlegt, dessen positive X-Axe, Y-Achse und Z-Achse bezüglich die Gangrichtung, die Seitenrichtung nach rechts und die verticale Richtung nach oben besitzen möge. Dieses Coordinatensystem braucht nicht unbedingt mit dem rechtwinkligen Coordinatensystem identisch zu sein, auf welches der ganze Bewegungsvorgang bezogen worden ist, es muss aber infolge der Festsetzung über die Richtungen seiner Axen auf alle Fälle mit demselben parallel sein. Der Mittelpunkt P des distalen Gelenks (vgl. die folgende Figur 2) besitzt dann, wie man leicht einsehen wird, in diesem Coordinatensystem die drei Coordinaten $x_d - x_p$, $y_d - y_p$ und $z_d - z_p$, wenn man

unter x_p, y_p, z_p die auf das ursprüngliche System bezogenen Coordinaten des proximalen, und unter x_d, y_d, z_d die des distalen Gelenkmittelpunktes versteht. Die Werthe dieser Coordinaten finden sich für die Mittelpunkte sämmtlicher Gelenke und für alle drei Versuche in den Tabellen 10, 11 und 12 (S. 258—263) des I. Theils der Untersuchung über den Gang des Menschen niedergelegt.

Bezeichnet man mit P' die Projection des Punktes P auf die der Gangebene parallele Coordinatenebene (XZ-Ebene), mit P'' die Projection von P auf die zur Gangrichtung senkrechte Coordinatenebene (YZ-Ebene) und mit V die Projection von P auf die Z-Axe, so stellen OP', OP'' und OV die Projectionen der Längsaxe OP auf die Gangebene, die zur Gangrichtung senkrechte Ebene und die verticale Coordinatenaxe dar. Die Winkel, welche die Projectionen OP' und OP'' mit der von O nach unten gerichteten Verticalen bilden, seien φ und ψ. Ferner bilde die Verticalebene durch OP (Ebene des Dreiecks OPV) mit der Gangebene den Winkel α, und die Richtung der Längsaxe OP selbst mit der von O nach unten gerichteten Verticalen den Winkel ε. Dann wird durch je zwei der vier Winkel die Richtung der betreffenden Längsaxe im Raume eindeutig bestimmt. Man kann also z. B. φ und ψ oder auch die beiden Winkel α und ε als Winkelcoordinaten für die Richtung der Längsaxe auffassen.

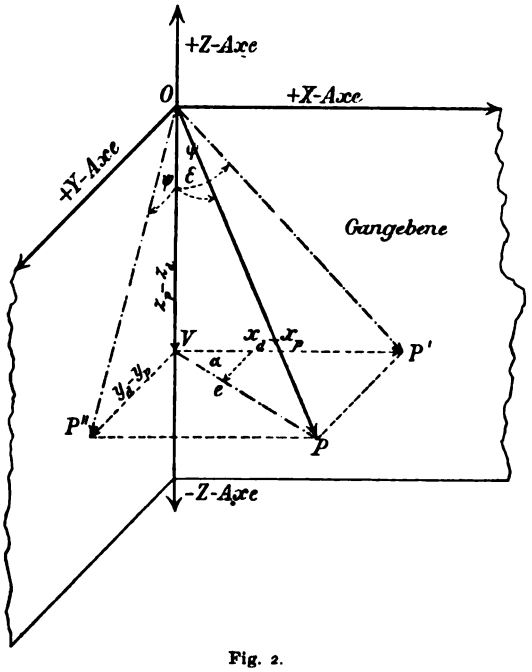


Fig. 2.

Zur Bestimmung des Paares φ, ψ hat man, wie aus Figur 2 ohne Weiteres ersichtlich ist, die Relationen

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{x_d - x_p}{z_p - z_d} \quad \text{und} \quad \operatorname{tg}\psi = \frac{y_d - y_p}{z_p - z_d}.$$

Es ist dabei zu beachten, dass im Nenner der Formeln als Minuend die zum Mittelpunkt des proximalen Gelenks gehörende verticale Coordinate steht, weil unter φ und ψ die Winkel verstanden werden sollen, welche die Projectionen der in distaler Richtung genommenen Längsaxe auf die beiden Coordinatenebenen mit der negativen Richtung der Z-Axe bilden. Dabei ergibt sich für φ ein positiver oder negativer Werth, je nachdem die betreffende Längsaxe in der Projection auf die Gangebene nach vorn oder hinten von der nach unten gerichteten Verticalen abweicht. Ferner besitzt ψ einen positiven oder negativen Werth, je nachdem die Längsaxe in der Projection auf die zur Gangrichtung senkrechte Ebene nach rechts oder links von der nach unten gerichteten Verticalen abweicht.

Ferner ergibt sich ohne Weiteres zur Berechnung von α die Formel

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y_d - y_p}{x_d - x_p}.$$

Dabei erhält α einen positiven Werth, wenn die Verticalebene durch die Längsaxe gegen den vorderen Theil der Gangebene von oben gesehen im Sinne des Uhrzeigers gedreht erscheint, und zwar um einen Winkel, der kleiner ist als 180^0, weil für Winkel über 180^0 besser α negativ genommen wird.

Der Winkel ε kommt in dem rechtwinkligen Dreieck OPV vor. Bezeichnet man den Abstand PV des Punktes P von der verticalen Z-Axe mit e, so ergibt sich zunächst

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{e}{z_p - z_d}.$$

Nun folgt aber aus dem Dreieck $PP'V$

$$e = \frac{x_d - x_p}{\cos \alpha} = \frac{y_d - y_p}{\sin \alpha}.$$

Setzt man einen dieser Werthe in die Formel für $tg\,\varepsilon$ ein und beachtet gleichzeitig die obigen Formeln für $\operatorname{tg} \varphi$ und $\operatorname{tg} \psi$, so ergibt sich schliesslich zur Berechnung von ε aus den Winkeln φ und α, bezüglich ψ und α, die Formel

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos \alpha} = \frac{\operatorname{tg} \psi}{\sin \alpha}.$$

Für ε ist ein Vorzeichen nicht erforderlich.

Mit Hülfe dieser Formeln sind nun beiderseits für die Längsaxe des Oberschenkels und Unterschenkels und für die Verbindungslinie des Mittelpunktes vom I. Fussgelenk mit dem Schwerpunkt des Fusses zu sämmtlichen 31 Bewegungsphasen von allen drei Versuchen die Werthe der vier Winkel φ, ψ, α und ε berechnet, und die Resultate in den folgenden Tabellen 2, 3 und 4 niedergelegt worden. Dabei tragen die zu einem Körpertheil gehörenden Winkel die Nummer als Index, welche schon früher für das betreffende Glied verwendet worden ist. Es sind nämlich dem Oberschenkel, Unterschenkel und Fuss des rechten Beins bezüglich die Nummern 2, 4 und 6 und den entsprechenden Gliedern des linken Beins bezüglich die Nummern 3, 5 und 7 zugetheilt worden.

Tabelle 2. I. Versuch.

Nr.	Oberschenkel rechts φ_2	ψ_2	α_2	ε_2	links φ_3	ψ_3	α_3	ε_3	Nr.
1	− 0° 20′	+ 6° 18′	+ 92° 58′	6° 20′	+ 17° 0′	+ 0° 11′	+ 0° 34′	17° 0′	1
2	+ 7° 4′	+ 5° 32′	+ 38° 0′	8° 56′	+ 10° 47′	− 0° 2′	− 0° 10′	10° 47′	2
3	+ 13° 49′	+ 4° 57′	+ 19° 25′	14° 37′	+ 4° 25′	+ 0° 28′	+ 5° 58′	4° 27′	3
4	+ 19° 9′	+ 4° 9′	+ 11° 47′	19° 32′	− 1° 52′	+ 1° 10′	+ 148° 5′	2° 11′	4
5	+ 23° 22′	+ 3° 18′	+ 7° 37′	23° 33′	− 7° 30′	+ 2° 2′	+ 164° 54′	7° 46′	5
6	+ 26° 7′	+ 2° 39′	+ 5° 23′	26° 13′	− 12° 26′	+ 2° 35′	+ 168° 24′	12° 41′	6
7	+ 26° 43′	+ 1° 24′	+ 2° 46′	26° 44′	− 16° 41′	+ 3° 8′	+ 169° 39′	16° 56′	7
8	+ 26° 35′	− 0° 12′	− 0° 25′	26° 35′	− 20° 37′	+ 3° 15′	+ 171° 26′	20° 50′	8
9	+ 27° 41′	− 0° 26′	− 0° 49′	27° 41′	− 23° 17′	+ 2° 27′	+ 174° 19′	23° 24′	9
10	+ 30° 19′	+ 0° 15′	+ 0° 26′	30° 19′	− 24° 17′	+ 0° 44′	+ 178° 22′	24° 17′	10
11	+ 28° 38′	+ 0° 21′	+ 0° 39′	28° 38′	− 23° 44′	− 1° 51′	− 175° 48′	23° 48′	11
12	+ 28° 44′	+ 2° 7′	+ 3° 52′	28° 48′	− 19° 4′	− 4° 43′	− 166° 33′	19° 34′	12
13	+ 27° 3′	+ 1° 21′	+ 2° 38′	27° 5′	− 11° 26′	− 6° 10′	− 151° 52′	12° 55′	13
14	+ 20° 30′	+ 0° 51′	+ 2° 18′	20° 31′	− 3° 36′	− 6° 44′	− 118° 6′	7° 37′	14
15	+ 13° 19′	− 0° 36′	− 2° 32′	13° 20′	+ 4° 4′	− 6° 31′	− 58° 3′	7° 40′	15
16	+ 6° 48′	− 1° 55′	− 15° 44′	7° 4′	+ 9° 7′	− 6° 17′	− 34° 28′	11° 1′	16
17	+ 0° 50′	− 2° 41′	− 72° 36′	2° 49′	+ 16° 5′	− 5° 40′	− 19° 0′	16° 57′	17
18	− 4° 48′	− 3° 4′	− 147° 26′	5° 42′	+ 20° 38′	− 4° 37′	− 12° 6′	21° 4′	18
19	− 10° 9′	− 3° 17′	− 162° 12′	10° 39′	+ 23° 25′	− 3° 33′	− 8° 9′	23° 38′	19
20	− 14° 18′	− 3° 48′	− 165° 25′	14° 45′	+ 23° 20′	− 2° 8′	− 4° 57′	23° 25′	20
21	− 18° 19′	− 3° 45′	− 168° 48′	18° 39′	+ 21° 34′	− 0° 27′	− 1° 9′	21° 34′	21
22	− 20° 57′	− 2° 53′	− 172° 29′	21° 7′	+ 22° 13′	+ 0° 6′	+ 0° 14′	22° 13′	22
23	− 21° 53′	− 1° 23′	− 176° 34′	21° 55′	+ 25° 37′	− 0° 47′	− 1° 37′	25° 38′	23
24	− 21° 20′	+ 1° 3′	+ 177° 18′	21° 21′	+ 22° 23′	− 0° 44′	− 1° 46′	22° 23′	24
25	− 16° 32′	+ 3° 51′	+ 167° 13′	16° 56′	+ 21° 58′	− 0° 51′	− 2° 6′	21° 59′	25
26	− 7° 45′	+ 4° 37′	+ 149° 20′	9° 0′	+ 21° 19′	− 1° 24′	− 3° 36′	21° 21′	26
27	− 0° 9′	+ 4° 10′	+ 91° 56′	4° 11′	+ 15° 20′	− 0° 54′	− 3° 15′	15° 22′	27
28	+ 6° 44′	+ 3° 59′	+ 30° 32′	7° 49′	+ 9° 0′	− 0° 40′	− 4° 9′	9° 1′	28
29	+ 12° 15′	+ 3° 35′	+ 16° 5′	12° 44′	+ 2° 56′	+ 0° 9′	+ 3° 1′	2° 56′	29
30	+ 17° 47′	+ 3° 25′	+ 10° 33′	18° 4′	− 2° 34′	+ 0° 27′	+ 170° 9′	2° 36′	30
31	+ 21° 49′	+ 3° 32′	+ 8° 47′	22° 3′	− 7° 37′	+ 0° 39′	+ 175° 11′	7° 38′	31

Unterschenkel

Nr.	rechts				links				Nr.
	φ_4	ψ_4	α_4	ε_4	φ_5	ψ_5	α_5	ε_5	
1	−57° 6′	− 9° 11′	−174° 2′	57° 15′	+ 2° 30′	+7° 4′	+ 70° 38′	7° 29′	1
2	−52° 8′	− 7° 36′	−174° 4′	52° 17′	+ 0° 12′	+7° 10′	+ 88° 22′	7° 11′	2
3	−42° 56′	− 6° 27′	−173° 4′	43° 9′	− 1° 43′	+6° 36′	+104° 31′	6° 49′	3
4	−31° 13′	− 5° 15′	−171° 23′	31° 30′	− 3° 22′	+5° 50′	+119° 54′	6° 43′	4
5	−17° 31′	− 4° 25′	−166° 15′	18° 0′	− 5° 36′	+5° 8′	+137° 25′	7° 34′	5
6	− 2° 50′	− 3° 45′	−126° 57′	4° 42′	− 8° 35′	+4° 51′	+150° 40′	9° 50′	6
7	+12° 48′	− 2° 15′	− 9° 50′	12° 59′	−12° 25′	+4° 39′	+159° 45′	13° 13′	7
8	+26° 22′	+ 0° 21′	+ 0° 42′	26° 22′	−17° 10′	+4° 38′	+165° 19′	17° 43′	8
9	+28° 9′	− 0° 5′	− 0° 8′	28° 9′	−22° 42′	+4° 47′	+168° 41′	23° 6′	9
10	+19° 39′	− 2° 48′	− 7° 48′	19° 49′	−29° 8′	+5° 12′	+170° 44′	29° 27′	10
11	+15° 32′	− 3° 55′	− 13° 50′	15° 58′	−36° 14′	+5° 56′	+171° 56′	36° 30′	11
12	+ 6° 39′	− 6° 26′	− 44° 5′	9° 13′	−44° 31′	+8° 16′	+171° 36′	44° 50′	12
13	− 0° 21′	− 7° 9′	− 92° 48′	7° 9′	−52° 3′	+9° 47′	+172° 20′	52° 18′	13
14	− 2° 48′	− 7° 46′	−109° 44′	8° 14′	−53° 8′	+9° 44′	+172° 40′	53° 21′	14
15	− 4° 4′	− 7° 5′	−119° 46′	8° 9′	−46° 57′	+8° 26′	+172° 7′	47° 14′	15
16	− 5° 2′	− 6° 1′	−129° 52′	7° 49′	−38° 42′	+7° 40′	+170° 28′	39° 5′	16
17	− 6° 29′	− 5° 13′	−141° 14′	8° 17′	−26° 45′	+6° 34′	+167° 8′	27° 21′	17
18	− 8° 16′	− 4° 40′	−150° 39′	9° 28′	−14° 42′	+5° 26′	+160° 5′	15° 35′	18
19	−11° 0′	− 4° 27′	−158° 9′	11° 49′	− 0° 26′	+4° 15′	+ 95° 54′	4° 17′	19
20	−14° 57′	− 3° 52′	−165° 50′	15° 24′	+15° 15′	+2° 32′	+ 9° 12′	15° 27′	20
21	−18° 57′	− 3° 54′	−168° 45′	19° 17′	+28° 12′	+0° 1′	+ 0° 2′	28° 12′	21
22	−24° 18′	− 4° 4′	−171° 2′	24° 33′	+29° 35′	− 0° 3′	− 0° 5′	29° 35′	22
23	−31° 9′	− 4° 36′	−172° 25′	31° 23′	+20° 30′	+2° 21′	+ 6° 15′	20° 37′	23
24	−38° 35′	− 6° 29′	−171° 53′	38° 52′	+18° 27′	+3° 0′	+ 8° 56′	18° 40′	24
25	−47° 30′	− 9° 40′	−171° 8′	47° 51′	+11° 50′	+4° 21′	+ 19° 56′	12° 34′	25
26	−56° 1′	−11° 41′	−172° 4′	56° 17′	+ 4° 13′	+5° 32′	+ 52° 46′	6° 56′	26
27	−56° 44′	−10° 27′	−173° 6′	56° 56′	+ 0° 50′	+5° 30′	+ 81° 28′	5° 33′	27
28	−51° 14′	− 9° 43′	−172° 10′	51° 29′	− 1° 42′	+5° 30′	+107° 11′	5° 45′	28
29	−42° 36′	− 8° 30′	−170° 46′	42° 59′	− 3° 50′	+4° 46′	+128° 46′	6° 7′	29
30	−31° 33′	− 7° 36′	−167° 43′	32° 8′	− 5° 45′	+4° 28′	+142° 12′	7° 15′	30
31	−18° 19′	− 6° 32′	−160° 54′	19° 18′	− 8° 5′	+4° 27′	+151° 19′	9° 11′	31

Fuss

Nr.	rechts				links				Nr.
	φ_6	ψ_6	α_6	ε_6	φ_7	ψ_7	α_7	ε_7	
1	−23° 11′	− 1° 57′	−175° 28′	23° 14′	+42° 57′	− 7° 59′	− 8° 35′	43° 16′	1
2	−14° 46′	− 0° 59′	−176° 15′	14° 48′	+42° 45′	− 8° 30′	− 9° 11′	43° 7′	2
3	− 2° 12′	+ 1° 3′	+154° 22′	2° 27′	+42° 25′	− 8° 41′	− 9° 29′	42° 48′	3
4	+11° 4′	+ 2° 36′	+ 13° 4′	11° 21′	+41° 53′	− 8° 24′	− 9° 21′	42° 16′	4
5	+26° 13′	+ 4° 14′	+ 8° 33′	26° 28′	+40° 48′	− 9° 1′	− 10° 25′	41° 16′	5
6	+39° 48′	+ 4° 53′	+ 5° 51′	39° 57′	+39° 51′	− 10° 3′	− 11° 59′	40° 28′	6
7	+53° 6′	+ 8° 7′	+ 6° 6′	53° 15′	+38° 13′	− 10° 55′	− 13° 46′	39° 2′	7
8	+65° 23′	+19° 9′	+ 9° 3′	65° 39′	+33° 49′	− 10° 15′	− 15° 7′	34° 45′	8
9	+67° 31′	+27° 22′	+ 12° 5′	67° 58′	+28° 17′	− 8° 26′	− 15° 25′	29° 10′	9
10	+61° 58′	+21° 44′	+ 11° 59′	62° 29′	+19° 47′	− 6° 11′	− 16° 45′	20° 35′	10
11	+49° 2′	+ 8° 45′	+ 7° 37′	49° 17′	+ 5° 20′	− 2° 19′	− 23° 30′	5° 48′	11
12	+42° 18′	+ 4° 21′	+ 4° 46′	42° 24′	−13° 16′	+ 1° 35′	+173° 17′	13° 21′	12
13	+40° 19′	+ 7° 1′	+ 8° 15′	40° 36′	−19° 54′	− 0° 20′	−179° 4′	19° 54′	13
14	+39° 15′	+ 7° 4′	+ 8° 38′	39° 34′	−19° 6′	∓ 0° 0′	∓ 180° 0′	19° 6′	14
15	+38° 37′	+ 7° 36′	+ 9° 29′	39° 0′	− 9° 17′	+ 0° 41′	+175° 53′	9° 18′	15
16	+38° 4′	+ 8° 18′	+ 10° 34′	38° 32′	+ 1° 0′	+ 0° 25′	+ 22° 37′	1° 5′	16
17	+37° 37′	+ 8° 48′	+ 11° 22′	38° 10′	+15° 28′	− 2° 23′	− 8° 35′	15° 38′	17
18	+37° 45′	+ 9° 33′	+ 12° 16′	38° 24′	+29° 21′	− 5° 59′	− 10° 33′	29° 47′	18
19	+37° 6′	+ 9° 51′	+ 12° 56′	37° 49′	+43° 24′	− 8° 16′	− 8° 44′	43° 44′	19
20	+35° 29′	+ 9° 48′	+ 13° 37′	36° 16′	+58° 3′	−11° 53′	− 7° 28′	58° 17′	20
21	+32° 13′	+10° 10′	+ 15° 53′	33° 14′	+70° 47′	−27° 39′	− 10° 21′	71° 4′	21
22	+26° 4′	+ 9° 8′	+ 18° 11′	27° 15′	+72° 10′	−33° 34′	− 12° 3′	72° 32′	22
23	+16° 11′	+ 7° 32′	+ 24° 30′	17° 42′	+65° 36′	−23° 58′	− 11° 24′	66° 2′	23
24	+ 1° 36′	+ 5° 34′	+ 74° 3′	5° 47′	+51° 51′	− 9° 26′	− 7° 26′	52° 6′	24
25	−14° 23′	+ 3° 53′	+165° 9′	14° 52′	+46° 19′	− 2° 20′	− 2° 14′	46° 20′	25
26	−23° 18′	+ 0° 22′	+179° 8′	23° 18′	+41° 52′	− 5° 27′	− 6° 5′	42° 2′	26
27	−21° 55′	− 4° 7′	−169° 50′	22° 14′	+41° 13′	− 5° 34′	− 6° 21′	41° 24′	27
28	−13° 31′	− 3° 45′	−164° 45′	13° 59′	+40° 40′	− 6° 24′	− 7° 27′	40° 55′	28
29	− 1° 29′	− 1° 19′	−138° 35′	1° 59′	+39° 46′	− 7° 2′	− 8° 27′	40° 4′	29
30	+12° 12′	+ 1° 27′	+ 6° 40′	12° 16′	+38° 54′	− 7° 34′	− 9° 21′	39° 16′	30
31	+25° 56′	+ 4° 22′	+ 8° 55′	26° 13′	+38° 2′	− 8° 18′	− 10° 35′	38° 30′	31

Oberschenkel

Nr.	rechts φ_2	rechts ψ_2	rechts α_2	rechts ε_2	links φ_2	links ψ_2	links α_2	links ε_2	Nr.
1	− 12° 14′	+ 5° 46′	+ 155° 0′	13° 27′	+ 24° 36′	− 0° 20′	− 0° 43′	24° 36′	1
2	− 6° 0′	+ 5° 45′	+ 136° 14′	8° 17′	+ 20° 47′	− 0° 35′	− 1° 32′	20° 47′	2
3	+ 1° 19′	+ 5° 13′	+ 75° 53′	5° 22′	+ 15° 5′	− 0° 46′	− 2° 51′	15° 6′	3
4	+ 9° 23′	+ 4° 54′	+ 27° 24′	10° 33′	+ 8° 44′	− 0° 6′	− 0° 36′	8° 44′	4
5	+ 15° 45′	+ 4° 46′	+ 16° 28′	16° 23′	+ 2° 21′	+ 0° 37′	+ 14° 34′	2° 26′	5
6	+ 21° 15′	+ 4° 21′	+ 11° 4′	21° 37′	− 4° 4′	+ 1° 23′	+ 161° 11′	4° 18′	6
7	+ 24° 42′	+ 3° 40′	+ 7° 55′	24° 55′	− 9° 28′	+ 1° 53′	+ 168° 53′	9° 39′	7
8	+ 25° 51′	+ 2° 55′	+ 6° 1′	25° 59′	− 13° 51′	+ 2° 27′	+ 170° 11′	14° 3′	8
9	+ 25° 29′	+ 1° 1′	+ 2° 8′	25° 30′	− 18° 30′	+ 2° 50′	+ 171° 36′	18° 41′	9
10	+ 25° 40′	− 0° 10′	− 0° 22′	25° 40′	− 21° 33′	+ 2° 35′	+ 173° 29′	21° 40′	10
11	+ 29° 9′	+ 0° 7′	+ 0° 12′	29° 9′	− 22° 41′	+ 1° 10′	+ 177° 13′	22° 43′	11
12	+ 29° 41′	− 0° 6′	− 0° 10′	29° 41′	− 22° 34′	− 0° 58′	− 177° 40′	22° 35′	12
13	+ 27° 40′	+ 0° 55′	+ 1° 45′	27° 41′	− 18° 39′	− 4° 3′	− 168° 8′	19° 1′	13
14	+ 27° 25′	+ 0° 46′	+ 1° 28′	27° 25′	− 11° 33′	− 5° 17′	− 155° 37′	12° 39′	14
15	+ 22° 19′	− 0° 22′	− 0° 53′	22° 19′	− 2° 32′	− 6° 4′	− 112° 37′	6° 34′	15
16	+ 16° 1′	− 1° 15′	− 4° 21′	16° 3′	+ 4° 48′	− 6° 15′	− 52° 30′	7° 52′	16
17	+ 9° 17′	− 1° 56′	− 11° 40′	9° 29′	+ 11° 10′	− 6° 12′	− 28° 48′	12° 42′	17
18	+ 2° 38′	− 2° 52′	− 47° 25′	3° 53′	+ 16° 53′	− 6° 1′	− 19° 8′	17° 49′	18
19	− 3° 28′	− 3° 21′	− 135° 58′	4° 49′	+ 21° 24′	− 5° 12′	− 13° 5′	21° 55′	19
20	− 8° 55′	− 3° 37′	− 158° 2′	9° 36′	+ 23° 56′	− 3° 55′	− 8° 46′	24° 11′	20
21	− 13° 27′	− 4° 2′	− 163° 35′	14° 0′	+ 23° 35′	− 2° 12′	− 5° 2′	23° 40′	21
22	− 17° 8′	− 4° 11′	− 166° 38′	17° 35′	+ 21° 36′	− 0° 24′	− 1° 1′	21° 37′	22
23	− 19° 42′	− 3° 6′	− 171° 25′	19° 54′	+ 22° 31′	+ 0° 45′	+ 1° 48′	22° 31′	23
24	− 20° 16′	− 1° 40′	− 175° 30′	20° 20′	+ 25° 47′	+ 0° 2′	+ 0° 4′	25° 47′	24
25	− 19° 17′	+ 0° 34′	+ 178° 24′	19° 18′	+ 22° 21′	+ 0° 22′	+ 0° 55′	22° 21′	25
26	− 13° 56′	+ 3° 31′	+ 166° 5′	14° 20′	+ 23° 6′	− 0° 5′	− 0° 12′	23° 6′	26
27	− 5° 11′	+ 4° 15′	+ 140° 39′	6° 41′	+ 21° 26′	− 0° 13′	− 0° 32′	21° 26′	27
28	+ 3° 5′	+ 4° 5′	+ 52° 58′	5° 7′	+ 16° 14′	∓ 0° 0′	∓ 0° 0′	16° 14′	28
29	+ 9° 38′	+ 4° 24′	+ 24° 24′	10° 34′	+ 9° 56′	+ 0° 40′	+ 3° 50′	9° 57′	29
30	+ 15° 13′	+ 4° 41′	+ 16° 47′	15° 52′	+ 3° 42′	+ 1° 25′	+ 20° 54′	3° 58′	30
31	+ 20° 24′	+ 4° 40′	+ 12° 22′	20° 51′	− 1° 57′	+ 1° 42′	+ 139° 4′	2° 35′	31

Unterschenkel

Nr.	rechts φ_4	rechts ψ_4	rechts α_4	rechts ε_4	links φ_5	links ψ_5	links α_5	links ε_5	Nr.
1	− 50° 57′	− 11° 57′	− 170° 16′	51° 22′	+ 7° 9′	+ 5° 41′	+ 38° 25′	9° 6′	1
2	− 56° 33′	− 13° 30′	− 170° 59′	56° 53′	+ 2° 29′	+ 6° 13′	+ 68° 18′	6° 41′	2
3	− 54° 34′	− 11° 52′	− 171° 30′	54° 52′	− 0° 34′	+ 6° 36′	+ 94° 50′	6° 36′	3
4	− 47° 17′	− 10° 2′	− 170° 43′	47° 39′	− 2° 46′	+ 6° 13′	+ 113° 52′	6° 48′	4
5	− 37° 17′	− 8° 17′	− 169° 11′	37° 47′	− 4° 25′	+ 5° 47′	+ 127° 20′	7° 16′	5
6	− 24° 39′	− 6° 31′	− 166° 2′	25° 18′	− 6° 2′	+ 5° 18′	+ 138° 45′	8° 0′	6
7	− 9° 49′	− 5° 4′	− 152° 53′	11° 0′	− 8° 42′	+ 5° 6′	+ 149° 46′	10° 2′	7
8	+ 4° 33′	− 3° 46′	− 39° 38′	5° 54′	− 11° 42′	+ 4° 53′	+ 157° 36′	12° 37′	8
9	+ 21° 27′	− 0° 56′	− 2° 22′	21° 28′	− 15° 42′	+ 4° 35′	+ 164° 5′	16° 18′	9
10	+ 29° 10′	+ 0° 3′	+ 0° 6′	29° 10′	− 20° 33′	+ 4° 37′	+ 167° 51′	20° 59′	10
11	+ 22° 14′	− 2° 41′	− 6° 32′	22° 21′	− 27° 10′	+ 5° 3′	+ 170° 14′	27° 30′	11
12	+ 15° 54′	− 4° 31′	− 15° 31′	16° 28′	− 34° 5′	+ 5° 40′	+ 171° 39′	34° 22′	12
13	+ 10° 1′	− 6° 38′	− 33° 23′	11° 56′	− 42° 25′	+ 7° 39′	+ 171° 38′	42° 43′	13
14	+ 1° 32′	− 7° 12′	− 78° 2′	7° 22′	− 50° 32′	+ 8° 52′	+ 172° 41′	50° 46′	14
15	− 2° 4′	− 7° 34′	− 105° 14′	7° 50′	− 53° 41′	+ 8° 51′	+ 173° 28′	53° 51′	15
16	− 4° 18′	− 7° 11′	− 120° 53′	8° 21′	− 48° 44′	+ 8° 16′	+ 172° 44′	48° 58′	16
17	− 5° 52′	− 6° 43′	− 131° 7′	8° 53′	− 39° 44′	+ 7° 40′	+ 170° 47′	40° 6′	17
18	− 7° 13′	− 5° 54′	− 140° 49′	9° 17′	− 28° 29′	+ 6° 50′	+ 167° 32′	29° 4′	18
19	− 9° 3′	− 5° 24′	− 149° 16′	10° 30′	− 15° 25′	+ 5° 40′	+ 160° 13′	16° 20′	19
20	− 11° 30′	− 5° 9′	− 156° 4′	12° 32′	− 0° 58′	+ 4° 18′	+ 102° 39′	4° 25′	20
21	− 14° 36′	− 4° 45′	− 162° 17′	15° 17′	+ 13° 52′	+ 2° 45′	+ 10° 59′	14° 7′	21
22	− 18° 32′	− 4° 44′	− 166° 6′	19° 3′	+ 27° 0′	+ 0° 46′	+ 1° 30′	27° 0′	22
23	− 24° 37′	− 5° 14′	− 168° 41′	25° 3′	+ 28° 46′	+ 1° 8′	+ 2° 4′	28° 47′	23
24	− 31° 46′	− 6° 4′	− 170° 16′	32° 9′	+ 20° 12′	+ 3° 45′	+ 10° 7′	20° 29′	24
25	− 39° 35′	− 7° 40′	− 170° 45′	39° 57′	+ 18° 13′	+ 4° 29′	+ 13° 24′	18° 42′	25
26	− 48° 49′	− 10° 46′	− 170° 33′	49° 13′	+ 10° 23′	+ 6° 3′	+ 30° 0′	11° 57′	26
27	− 56° 56′	− 11° 40′	− 172° 21′	57° 10′	+ 3° 51′	+ 6° 48′	+ 60° 31′	7° 48′	27
28	− 57° 1′	− 9° 38′	− 173° 43′	57° 11′	+ 0° 10′	+ 7° 3′	+ 88° 41′	7° 3′	28
29	− 51° 17′	− 8° 24′	− 173° 15′	51° 29′	− 2° 29′	+ 6° 42′	+ 110° 16′	7° 8′	29
30	− 42° 9′	− 6° 54′	− 172° 23′	42° 24′	− 4° 29′	+ 6° 9′	+ 126° 7′	7° 35′	30
31	− 29° 49′	− 5° 37′	− 170° 15′	30° 11′	− 6° 22′	+ 5° 53′	+ 137° 16′	8° 38′	31

Nr.	Fuss								Nr.
	rechts				links				
	φ_6	ψ_6	α_6	ε_6	φ_7	ψ_7	α_7	ε_7	
1	− 20° 11′	+ 2° 19′	+ 173° 45′	20° 18′	+ 44° 16′	− 6° 5′	− 6° 15′	44° 27′	1
2	− 22° 51′	− 0° 17′	− 179° 20′	22° 51′	+ 43° 15′	− 7° 6′	− 7° 32′	43° 30′	2
3	− 19° 23′	− 4° 17′	− 168° 0′	19° 47′	+ 42° 30′	− 7° 3′	− 7° 41′	42° 45′	3
4	− 8° 40′	− 2° 8′	− 166° 14′	8° 55′	+ 41° 56′	− 7° 7′	− 7° 54′	42° 12′	4
5	+ 3° 54′	− 0° 16′	− 3° 54′	3° 55′	+ 41° 14′	− 6° 41′	− 7° 37′	41° 29′	5
6	+ 17° 54′	+ 2° 46′	+ 8° 32′	18° 6′	+ 40° 36′	− 6° 45′	− 7° 52′	40° 52′	6
7	+ 32° 59′	+ 5° 36′	+ 8° 36′	33° 17′	+ 40° 6′	− 6° 55′	− 8° 12′	40° 23′	7
8	+ 45° 54′	+ 6° 49′	+ 6° 36′	46° 6′	+ 39° 37′	− 7° 39′	− 9° 13′	39° 59′	8
9	+ 59° 40′	+ 12° 10′	+ 7° 12′	59° 52′	+ 36° 38′	− 7° 25′	− 9° 55′	37° 3′	9
10	+ 67° 20′	+ 27° 5′	+ 12° 3′	67° 47′	+ 33° 10′	− 7° 39′	− 11° 37′	33° 42′	10
11	+ 62° 14′	+ 24° 4′	+ 13° 14′	62° 52′	+ 23° 30′	− 4° 36′	− 10° 30′	23° 51′	11
12	+ 53° 58′	+ 12° 27′	+ 9° 8′	54° 19′	+ 11° 14′	− 1° 46′	− 8° 52′	11° 22′	12
13	+ 44° 13′	+ 7° 10′	+ 7° 22′	44° 28′	− 8° 23′	+ 2° 31′	+ 163° 21′	8° 45′	13
14	+ 41° 14′	+ 5° 47′	+ 6° 35′	41° 25′	− 17° 56′	+ 1° 14′	+ 176° 11′	17° 59′	14
15	+ 39° 32′	+ 6° 30′	+ 7° 51′	39° 48′	− 20° 10′	+ 1° 26′	+ 176° 7′	20° 12′	15
16	+ 39° 7′	+ 6° 36′	+ 8° 5′	39° 24′	− 12° 16′	+ 1° 55′	+ 171° 17′	12° 24′	16
17	+ 38° 51′	+ 7° 3′	+ 8° 44′	39° 10′	− 0° 45′	+ 1° 49′	+ 112° 15′	1° 58′	17
18	+ 38° 11′	+ 7° 37′	+ 9° 39′	38° 35′	+ 12° 28′	− 0° 5′	− 0° 23′	12° 28′	18
19	+ 37° 37′	+ 8° 13′	+ 10° 36′	38° 6′	+ 27° 46′	− 3° 51′	− 7° 18′	27° 57′	19
20	+ 37° 13′	+ 8° 42′	+ 11° 24′	37° 46′	+ 42° 32′	− 7° 3′	− 7° 41′	42° 48′	20
21	+ 35° 50′	+ 8° 48′	+ 12° 6′	36° 27′	+ 57° 30′	− 12° 40′	− 8° 9′	57° 46′	21
22	+ 33° 2′	+ 9° 52′	+ 14° 59′	33° 56′	+ 69° 26′	− 21° 46′	− 8° 31′	69° 39′	22
23	+ 26° 24′	+ 7° 26′	+ 14° 43′	27° 10′	+ 72° 56′	− 33° 57′	− 11° 40′	73° 16′	23
24	+ 15° 32′	+ 6° 19′	+ 21° 41′	16° 40′	+ 65° 47′	− 21° 50′	− 10° 13′	66° 7′	24
25	+ 0° 27′	+ 3° 28′	+ 82° 42′	3° 30′	+ 53° 57′	− 1° 39′	− 1° 12′	53° 57′	25
26	− 16° 27′	+ 0° 37′	+ 177° 54′	16° 27′	+ 48° 27′	− 1° 22′	− 1° 13′	48° 27′	26
27	− 22° 59′	− 2° 39′	− 173° 45′	23° 6′	+ 43° 56′	− 3° 57′	− 4° 6′	44° 0′	27
28	− 21° 45′	− 4° 47′	− 168° 10′	22° 11′	+ 43° 5′	− 4° 41′	− 5° 0′	43° 12′	28
29	− 13° 14′	− 3° 36′	− 165° 0′	13° 41′	+ 42° 35′	− 5° 14′	− 5° 42′	42° 43′	29
30	− 0° 52′	− 0° 37′	− 145° 0′	1° 4′	+ 41° 50′	− 5° 46′	− 6° 26′	42° 0′	30
31	+ 12° 45′	+ 2° 25′	+ 10° 33′	12° 58′	+ 41° 4′	− 6° 2′	− 6° 55′	41° 17′	31

III. Versuch. Tabelle 4.

Nr.	Oberschenkel								Nr.
	rechts				links				
	φ_2	ψ_2	α_2	ε_2	φ_3	ψ_3	α_3	ε_3	
1	+ 1° 38′	+ 4° 10′	+ 68° 35′	4° 29′	+ 10° 21′	+ 2° 17′	+ 12° 20′	10° 36′	1
2	+ 8° 11′	+ 4° 17′	+ 27° 30′	9° 13′	+ 4° 49′	+ 2° 12′	+ 24° 27′	5° 17′	2
3	+ 13° 59′	+ 5° 0′	+ 19° 22′	14° 47′	− 0° 22′	+ 2° 19′	+ 98° 53′	2° 20′	3
4	+ 17° 46′	+ 5° 5′	+ 15° 31′	18° 24′	− 5° 21′	+ 2° 20′	+ 156° 25′	5° 50′	4
5	+ 19° 20′	+ 4° 32′	+ 12° 45′	19° 47′	− 10° 3′	+ 2° 12′	+ 167° 43′	10° 17′	5
6	+ 18° 42′	+ 3° 57′	+ 11° 31′	19° 3′	− 14° 43′	+ 2° 24′	+ 170° 57′	14° 54′	6
7	+ 17° 21′	+ 2° 40′	+ 8° 29′	17° 31′	− 18° 23′	+ 2° 6′	+ 173° 42′	18° 30′	7
8	+ 19° 30′	+ 2° 51′	+ 8° 1′	19° 40′	− 20° 31′	+ 1° 15′	+ 176° 44′	20° 33′	8
9	+ 22° 26′	+ 4° 32′	+ 10° 53′	22° 48′	− 21° 49′	− 0° 15′	− 179° 23′	21° 49′	9
10	+ 19° 6′	+ 4° 12′	+ 11° 59′	19° 30′	− 20° 32′	− 2° 15′	− 174° 2′	20° 38′	10
11	+ 19° 3′	+ 4° 34′	+ 13° 2′	19° 31′	− 14° 22′	− 4° 44′	− 162° 3′	15° 4′	11
12	+ 17° 47′	+ 4° 14′	+ 12° 58′	18° 13′	− 6° 10′	− 4° 47′	− 142° 14′	7° 47′	12
13	+ 11° 17′	+ 3° 10′	+ 15° 30′	11° 42′	+ 1° 57′	− 4° 17′	− 65° 27′	4° 42′	13
14	+ 4° 10′	+ 2° 36′	+ 31° 55′	4° 55′	+ 8° 37′	− 4° 27′	− 27° 8′	9° 40′	14
15	− 2° 5′	+ 2° 2′	+ 135° 38′	2° 54′	+ 14° 55′	− 4° 38′	− 16° 54′	15° 34′	15
16	− 7° 2′	+ 1° 46′	+ 166° 0′	7° 15′	+ 19° 52′	− 4° 30′	− 12° 18′	20° 17′	16
17	− 12° 13′	+ 1° 55′	+ 171° 12′	12° 21′	+ 23° 6′	− 4° 22′	− 10° 10′	23° 25′	17
18	− 17° 12′	+ 1° 54′	+ 173° 53′	17° 17′	+ 24° 29′	− 4° 8′	− 9° 1′	24° 45′	18
19	− 21° 3′	+ 1° 48′	+ 175° 19′	21° 7′	+ 23° 37′	− 3° 10′	− 7° 13′	23° 47′	19
20	− 24° 26′	+ 2° 22′	+ 174° 48′	24° 31′	+ 21° 7′	− 1° 13′	− 3° 9′	21° 9′	20
21	− 26° 45′	+ 3° 13′	+ 173° 39′	26° 53′	+ 21° 16′	− 1° 4′	− 2° 45′	21° 18′	21
22	− 27° 5′	+ 4° 44′	+ 170° 49′	27° 23′	+ 22° 20′	− 0° 59′	− 2° 25′	22° 21′	22
23	− 25° 15′	+ 5° 48′	+ 167° 52′	25° 45′	+ 20° 48′	− 1° 39′	− 4° 20′	20° 51′	23
24	− 19° 44′	+ 7° 12′	+ 160° 36′	20° 50′	+ 20° 14′	− 1° 28′	− 3° 58′	20° 17′	24
25	− 11° 37′	+ 6° 51′	+ 149° 42′	13° 24′	+ 17° 43′	− 1° 9′	− 3° 35′	17° 45′	25
26	− 3° 33′	+ 6° 12′	+ 119° 48′	7° 8′	+ 12° 37′	− 0° 15′	− 1° 8′	12° 37′	26
27	+ 2° 54′	+ 5° 8′	+ 60° 36′	5° 53′	+ 6° 32′	+ 0° 10′	+ 1° 25′	6° 32′	27
28	+ 8° 42′	+ 4° 37′	+ 27° 53′	9° 49′	+ 0° 56′	+ 0° 43′	+ 37° 26′	1° 10′	28
29	+ 13° 43′	+ 4° 1′	+ 16° 4′	14° 15′	− 4° 14′	+ 1° 20′	+ 162° 27′	4° 26′	29
30	+ 17° 19′	+ 3° 33′	+ 11° 14′	17° 38′	− 8° 54′	+ 1° 45′	+ 168° 57′	9° 4′	30
31	+ 19° 27′	+ 2° 35′	+ 7° 17′	19° 35′	− 12° 53′	+ 2° 2′	+ 171° 11′	13° 2′	31

Unterschenkel

Nr.	rechts				links				Nr.
	φ_4	ψ_4	α_4	ε_4	φ_5	ψ_5	α_5	ε_5	
1	− 43° 56′	− 4° 28′	− 175° 22′	44° 2′	− 3° 36′	+ 4° 44′	+ 127° 18′	5° 56′	1
2	− 34° 18′	− 4° 2′	− 174° 6′	34° 27′	− 5° 26′	+ 4° 19′	+ 141° 35′	6° 56′	2
3	− 22° 25′	− 3° 51′	− 170° 45′	22° 40′	− 7° 27′	+ 3° 51′	+ 152° 46′	8° 22′	3
4	− 9° 4′	− 2° 31′	− 164° 33′	9° 24′	− 9° 45′	+ 3° 38′	+ 159° 47′	10° 23′	4
5	+ 5° 45′	− 0° 26′	− 4° 19′	5° 46′	− 12° 25′	+ 3° 25′	+ 164° 48′	12° 51′	5
6	+ 20° 32′	+ 2° 11′	+ 5° 49′	20° 38′	− 15° 29′	+ 3° 19′	+ 168° 12′	15° 48′	6
7	+ 31° 35′	+ 5° 20′	+ 8° 38′	31° 53′	− 19° 50′	+ 3° 28′	+ 170° 28′	20° 5′	7
8	+ 30° 44′	+ 5° 7′	+ 8° 33′	31° 1′	− 24° 21′	+ 3° 13′	+ 172° 54′	24° 31′	8
9	+ 23° 33′	+ 2° 7′	+ 4° 52′	23° 38′	− 30° 16′	+ 3° 17′	+ 174° 23′	30° 24′	9
10	+ 21° 13′	+ 1° 15′	+ 3° 12′	21° 15′	− 38° 20′	+ 4° 14′	+ 174° 39′	38° 27′	10
11	+ 13° 9′	− 0° 40′	− 2° 49′	13° 10′	− 48° 8′	+ 6° 30′	+ 174° 10′	48° 17′	11
12	+ 6° 9′	− 1° 35′	− 14° 25′	6° 21′	− 56° 10′	+ 6° 34′	+ 175° 35′	56° 15′	12
13	+ 4° 1′	− 1° 30′	− 20° 32′	4° 17′	− 56° 22′	+ 7° 22′	+ 175° 5′	56° 27′	13
14	+ 3° 16′	− 1° 13′	− 20° 23′	3° 30′	− 50° 37′	+ 9° 37′	+ 172° 5′	50° 53′	14
15	+ 1° 50′	− 0° 53′	− 25° 29′	2° 2′	− 41° 29′	+ 9° 57′	+ 168° 47′	42° 2′	15
16	− 0° 37′	− 0° 42′	− 131° 16′	0° 56′	− 29° 48′	+ 8° 35′	+ 165° 14′	30° 39′	16
17	− 3° 3′	− 0° 39′	− 168° 4′	3° 7′	− 16° 14′	+ 6° 59′	+ 157° 11′	17° 32′	17
18	− 5° 19′	− 0° 25′	− 175° 34′	5° 20′	− 1° 38′	+ 5° 4′	+ 107° 51′	5° 19′	18
19	− 8° 58′	− 0° 5′	− 179° 27′	8° 58′	+ 14° 8′	+ 2° 2′	+ 8° 2′	14° 16′	19
20	− 13° 5′	+ 0° 17′	+ 178° 49′	13° 6′	+ 26° 5′	− 2° 54′	− 5° 55′	26° 12′	20
21	− 18° 3′	+ 0° 38′	+ 178° 2′	18° 4′	+ 26° 17′	− 2° 17′	− 4° 37′	26° 21′	21
22	− 24° 28′	+ 1° 1′	+ 177° 47′	24° 29′	+ 20° 14′	− 0° 37′	− 1° 41′	20° 14′	22
23	− 31° 10′	+ 1° 9′	+ 178° 6′	31° 11′	+ 15° 23′	+ 2° 4′	+ 7° 27′	15° 31′	23
24	− 39° 35′	+ 0° 23′	+ 179° 32′	39° 35′	+ 8° 12′	+ 3° 17′	+ 21° 40′	8° 49′	24
25	− 46° 53′	− 0° 9′	− 179° 51′	46° 53′	+ 2° 10′	+ 3° 57′	+ 61° 22′	4° 30′	25
26	− 47° 8′	− 1° 31′	− 178° 36′	47° 8′	− 1° 13′	+ 4° 2′	+ 106° 44′	4° 13′	26
27	− 41° 25′	− 3° 21′	− 176° 12′	41° 29′	− 2° 49′	+ 3° 55′	+ 125° 49′	4° 49′	27
28	− 33° 5′	− 4° 53′	− 172° 32′	33° 19′	− 4° 17′	+ 3° 37′	+ 139° 54′	5° 36′	28
29	− 21° 50′	− 5° 37′	− 166° 13′	22° 25′	− 6° 24′	+ 3° 19′	+ 152° 39′	7° 12′	29
30	− 8° 42′	− 6° 0′	− 145° 33′	10° 31′	− 8° 48′	+ 3° 12′	+ 160° 6′	9° 21′	30
31	+ 5° 23′	− 5° 22′	− 44° 55′	7° 35′	− 11° 53′	+ 3° 20′	+ 164° 32′	12° 19′	31

Fuss

Nr.	rechts				links				Nr.
	φ_6	ψ_6	α_6	ε_6	φ_7	ψ_7	α_7	ε_7	
1	− 10° 8′	− 3° 10′	− 162° 47′	10° 36′	+ 41° 48′	− 9° 41′	− 10° 49′	42° 19′	1
2	+ 2° 10′	− 2° 10′	− 45° 0′	3° 4′	+ 41° 38′	− 9° 58′	− 11° 11′	42° 11′	2
3	+ 16° 38′	− 0° 51′	− 2° 51′	16° 39′	+ 41° 21′	− 10° 19′	− 11° 41′	41° 57′	3
4	+ 30° 24′	+ 0° 56′	+ 1° 36′	30° 24′	+ 41° 7′	− 11° 20′	− 12° 56′	41° 51′	4
5	+ 44° 0′	+ 2° 19′	+ 2° 23′	44° 2′	+ 40° 19′	− 11° 52′	− 13° 55′	41° 10′	5
6	+ 57° 11′	+ 8° 0′	+ 5° 11′	57° 18′	+ 39° 28′	− 11° 43′	− 14° 6′	40° 20′	6
7	+ 68° 13′	+ 18° 26′	+ 7° 35′	68° 23′	+ 36° 45′	− 10° 13′	− 13° 35′	37° 32′	7
8	+ 68° 8′	+ 22° 57′	+ 9° 39′	68° 25′	+ 28° 27′	− 8° 15′	− 14° 59′	29° 17′	8
9	+ 59° 42′	+ 13° 3′	+ 7° 43′	59° 55′	+ 18° 10′	− 5° 30′	− 16° 21′	18° 52′	9
10	+ 46° 59′	+ 4° 7′	+ 3° 56′	47° 4′	+ 3° 50′	− 1° 27′	− 20° 48′	4° 6′	10
11	+ 42° 10′	+ 3° 7′	+ 3° 26′	42° 13′	− 12° 18′	− 0° 10′	− 179° 15′	12° 18′	11
12	+ 39° 59′	+ 3° 46′	+ 4° 29′	40° 4′	− 17° 53′	− 1° 38′	− 174° 57′	17° 57′	12
13	+ 39° 14′	+ 4° 1′	+ 4° 55′	39° 20′	− 15° 16′	− 1° 54′	− 173° 4′	15° 23′	13
14	+ 39° 38′	+ 3° 17′	+ 3° 58′	39° 42′	− 7° 50′	− 1° 2′	− 172° 34′	7° 54′	14
15	+ 39° 21′	+ 4° 33′	+ 5° 32′	39° 29′	+ 3° 35′	− 0° 58′	− 14° 41′	3° 42′	15
16	+ 38° 43′	+ 3° 40′	+ 4° 34′	38° 48′	+ 17° 39′	− 4° 21′	− 13° 26′	18° 6′	16
17	+ 38° 25′	+ 7° 12′	+ 9° 3′	38° 46′	+ 31° 46′	− 8° 1′	− 12° 49′	32° 25′	17
18	+ 38° 21′	+ 8° 12′	+ 10° 19′	38° 48′	+ 46° 54′	− 9° 41′	− 9° 5′	47° 16′	18
19	+ 36° 27′	+ 8° 33′	+ 11° 30′	37° 1′	+ 62° 35′	− 16° 44′	− 8° 52′	62° 52′	19
20	+ 33° 52′	+ 8° 37′	+ 12° 43′	34° 32′	+ 72° 39′	− 32° 59′	− 11° 28′	72° 58′	20
21	+ 28° 14′	+ 7° 46′	+ 14° 16′	28° 59′	+ 73° 43′	− 38° 5′	− 12° 54′	74° 6′	21
22	+ 18° 53′	+ 6° 6′	+ 17° 21′	19° 43′	+ 66° 25′	− 25° 48′	− 11° 55′	66° 53′	22
23	+ 4° 15′	+ 4° 25′	+ 46° 12′	6° 7′	+ 52° 59′	− 10° 31′	− 7° 58′	53° 15′	23
24	− 12° 31′	+ 4° 23′	+ 160° 58′	13° 13′	+ 46° 46′	− 3° 59′	− 3° 45′	46° 49′	24
25	− 19° 5′	+ 2° 5′	+ 173° 59′	19° 11′	+ 43° 9′	− 6° 38′	− 7° 5′	43° 23′	25
26	− 17° 46′	− 1° 13′	− 176° 12′	17° 48′	+ 42° 0′	− 6° 45′	− 7° 30′	42° 14′	26
27	− 9° 21′	− 1° 57′	− 168° 22′	9° 33′	+ 41° 23′	− 6° 53′	− 7° 48′	41° 39′	27
28	+ 1° 16′	− 1° 11′	− 42° 53′	1° 44′	+ 40° 43′	− 7° 0′	− 8° 7′	41° 0′	28
29	+ 14° 23′	− 1° 8′	− 4° 24′	14° 26′	+ 40° 2′	− 7° 48′	− 9° 15′	40° 25′	29
30	+ 27° 35′	− 0° 31′	− 0° 59′	27° 35′	+ 39° 8′	− 8° 22′	− 10° 14′	39° 35′	30
31	+ 41° 44′	∓ 0° 0′	∓ 0° 0′	41° 44′	+ 38° 41′	− 8° 52′	− 11° 2′	39° 13′	31

Zur Veranschaulichung der stetigen Aenderung der Richtung der verschiedenen Längsaxen des Beines im Raume, und um die Möglichkeit zu geben, auch für solche Bewegungsphasen die Richtung der Längsaxen zu bestimmen, welche nicht bei den Versuchen durch die Photographie fixirt worden sind, finden sich auf den Tafeln V, VI und VII für die drei Versuche Diagramme aufgezeichnet, welche die Aenderung der Werthe der beiden Winkelcoordinaten φ und ψ in der Zeit zur Darstellung bringen. Die Diagramme sind so gezeichnet, dass auf einer horizontalen Abscissenlinie in gleichem Abstande von 5 mm Punkte markirt sind, die den aufeinanderfolgenden Nummern der 31 Bewegungsphasen entsprechen sollen. Von jedem Punkte aus findet sich dann nach oben oder unten vertical eine Länge abgetragen, welche durch die Anzahl ihrer Millimeter direct die Anzahl der Grade des Winkels φ oder ψ angibt, die sich bei einer bestimmten Längsaxe für die betreffende Bewegungsphase ergeben haben. Dabei ist immer für die zu den drei Abschnitten ein und desselben Beines gehörenden Werthe von φ die gleiche Abscissenlinie verwendet worden, damit die Vergleichung derselben erleichtert ist. Dasselbe gilt für die zu den drei Gliedern einer Extremität gehörenden Werthe von ψ. Auf der linken Seite einer jeden der drei Tafeln finden sich die Diagramme für die Winkelcoordinaten des rechten Beines, und auf der rechten Seite der Tafeln die entsprechenden Diagramme des linken Beines eingetragen, und zwar oben die Diagramme für die Winkel φ, darunter die für die Winkel ψ. Da ausserdem oben noch zwei andere Diagramme, welche sich auf Gelenkwinkel beziehen, unter Zugrundelegung der gleichen Abscissenlinie eingezeichnet sind, so wurden verschiedene Farben für die verschiedenen Abschnitte der Beine verwendet, und zwar durchweg für den Oberschenkel die schwarze, für den Unterschenkel die rothe und für den Fuss die blaue Farbe. Für die erwähnten zu Gelenkwinkeln gehörenden Diagramme sind, wie schon an dieser Stelle angeführt werden mag, zwei verschiedene Farben, nämlich die, welche zu den beiden durch das Gelenk mit einander verbundenen Abschnitten gehören, in Anwendung gekommen. Endlich finden sich bei allen drei Versuchen wieder wie in den Diagrammen des II. Theils durch verticale Linien die für den Gang besonders charakteristischen Momente des Aufsetzens eines Beines (R, L), des Ablösens eines Beines vom Boden

(S_r, S_l), des Aufsetzens eines Fusses mit ganzer Sohle (A_r, A_l) und des Anfanges vom Abwickeln eines Fusses vom Boden (E_r, E_l) markirt.

Ein Vergleich der entsprechenden, zu den beiden ersten Versuchen gehörenden Diagramme zeigt auch hier wieder die nahezu absolute Uebereinstimmung der Resultate dieser beiden, unter genau gleichen Verhältnissen angestellten Versuche. Dagegen springen in den Diagrammen des III. Versuchs, bei dem das Versuchsindividuum das volle Militärgepäck zu tragen hatte, sehr deutliche Abweichungen von den Resultaten der anderen Versuche in die Augen.

Was nun die oberen Diagramme anlangt, so lassen sich zunächst alle Resultate, welche früher für die Projection des Bewegungsvorganges auf die Gangebene aus der Darstellung auf Tafel I abgeleitet wurden, nicht nur mit grösserer Sicherheit bestätigen, sondern auch in Bezug auf die genaue Angabe der Winkelgrössen und mit Rücksicht auf die Verhältnisse beim Gang mit Belastung ergänzen.

So sieht man auf den ersten Blick, dass jeder Oberschenkel in dem Moment am weitsten nach vorn von der Verticalen abweicht, in dem sich das eigene Bein auf den Boden aufsetzt, und dass er gerade dann am weitsten nach hinten gegen die Verticale geneigt ist, wenn sich das andere Bein auf den Boden aufsetzt. Denn alle oberen Diagramme des rechten Oberschenkels besitzen im Moment R das Maximum und im Moment L das Minimum. Gerade umgedreht verhält es sich bei den entsprechenden Diagrammen des linken Oberschenkels. Nur beim III. Versuch findet eine geringe Abweichung von dieser Regel statt insofern, als der linke Oberschenkel (oberes schwarzes Diagramm auf Tafel VII) kurze Zeit nach dem Moment L ein Maximum und ebenfalls kurze Zeit nach dem Moment R das Minimum besitzt. Ausserdem lässt sich erkennen, dass dem ersteren Maximum ein etwas grösseres Maximum kurz vor dem Moment E_r vorausgeht. Das letztere ist jedoch nur um ca. 2^0 höher als das erstere. Dieses abweichende Verhalten des linken Oberschenkels beim III. Versuch kann darin begründet sein, dass der Körper infolge des über der linken Schulter getragenen Gewehrs auf der linken Seite stärker belastet war als auf der rechten. Auch betreffs des Winkels zwischen den extremen Haltungen des Oberschenkels lässt sich ein etwas ab-

normes Verhalten des linken Beines beim III. Versuch feststellen. Dieser Winkel beträgt, wie man aus den Diagrammen direct ablesen kann, auf halbe Grade abgerundet bei den drei aufeinanderfolgenden Versuchen für das rechte Bein bezüglich $52\frac{1}{2}^0$, 51^0 und 50^0, für das linke Bein dagegen 50^0, 49^0 und $44\frac{1}{2}^0$. Dabei kommen für das rechte Bein auf die grösste Abweichung von der Verticalen nach vorn im Moment R bezüglich $30\frac{1}{2}^0$, $30\frac{1}{2}^0$ und $22\frac{1}{2}^0$, und auf die grösste Abweichung nach hinten im Moment L bezüglich 22^0, $20\frac{1}{2}^0$ und $27\frac{1}{2}^0$. Beim linken Bein beträgt dagegen die grösste Abweichung nach vorn im Moment L bezüglich $25\frac{1}{2}^0$, 26^0 und $22\frac{1}{2}^0$, dagegen die grösste Abweichung nach hinten im Moment R bezüglich $24\frac{1}{2}^0$, 23^0 und 22^0. Das Tragen des Gepäcks hat also zunächst für beide Oberschenkel den Effect gehabt, dass im Moment des Aufsetzens ihres Beines auf den Boden die Abweichung nach vorn von der Verticalen verringert ist. Die Abweichung nach hinten ist dagegen beim rechten Oberschenkel grösser, beim linken dagegen etwas kleiner geworden. Auch hierin spricht sich eine Unsymmetrie im Verhalten der beiden Beine beim III. Versuch aus.

Aus den Diagrammen erkennt man weiter auf den ersten Blick, dass die grösste Ausweichung der Längsaxe des Unterschenkels (rothe Curve) nach vorn oder hinten von der Verticalen nicht zeitlich mit den grössten Neigungen des Oberschenkels gegen die Verticale zusammenfällt. Die grösste Ausweichung nach vorn tritt beim Unterschenkel früher als beim Oberschenkel, die grösste Ausweichung nach hinten dagegen beim Unterschenkel beträchtlich später als beim Oberschenkel ein. Das erste Ereigniss findet für den Unterschenkel am Ende des ersten Drittels der Periode des Abrollens des anderen Fusses vom Boden, das letzte nach dem erneuten Aufsetzen des anderen Fusses mit ganzer Sohle statt. Sie fallen also beide ausserhalb der Periode des Aufstehens des eigenen Beins, und zwar das eine ungefähr gerade so lange Zeit vor dem Beginn als das andere nach dem Ende dieser Periode.

Ganz ähnliches Verhalten zeigt die Verbindungslinie des Mittelpunktes vom I. Fussgelenk mit dem Schwerpunkt des Fusses.

Für den Unterschenkel beträgt die grösste Abweichung nach vorn bei den drei Versuchen auf der rechten Seite bezüglich $30\frac{1}{2}^0$, 29^0, 34^0 und auf der linken Seite 30^0, 30^0, $27\frac{1}{2}^0$, während die grösste Abweichung nach hinten rechts bezüglich die Werthe $57\frac{1}{2}^0$, 59^0, $48\frac{1}{2}^0$ und links die Werthe 54^0, 54^0 und $57\frac{1}{2}^0$ besitzt. Auch

hier spricht sich wieder deutliche Unsymmetrie in dem Verhalten der beiden Beine beim III. Versuch aus. Als Winkel zwischen den beiden extremen Stellungen der Längsaxe des Unterschenkels ergibt sich aus den angeführten Grössen rechts bezüglich 88°, 88°, 82½° und links 84°, 84°, 85°. Es zeigt sich also auch hierin vollkommene Uebereinstimmung zwischen den beiden ersten Versuchen.

Die Winkel, welche die Verbindungslinie des Fussgelenkmittelpunktes und des Fussschwerpunktes mit der Verticalen in den extremen Lagen macht, betragen für die Abweichung nach vorn beim rechten Fuss bezüglich 67½°, 67½°, 69½°, beim linken Fuss bezüglich 72½°, 73°, 74°, und für die Abweichung nach hinten von der Verticalen beim rechten Fuss bezüglich 24°, 23½°, 19½° und beim linken Fuss bezüglich 21°, 21°, 18°. Daraus resultiren als Winkel zwischen den extremen Lagen des Fusses in der Projection auf die Gangebene rechts 91½°, 91°, 89° und links 93½°, 94°, 92°.

Die letzteren Winkel sind nicht allzusehr verschieden von den entsprechenden Winkeln des Unterschenkels. Ueberhaupt zeigen die Tafeln V, VI und VII, dass die oberen Diagramme für den Fuss, abgesehen von dem in die Periode des Aufstehens des eigenen Beines mit ganzer Fusssohle fallenden Stück, den entsprechenden Diagrammen für den Unterschenkel sehr ähnlich sind, während die zum Oberschenkel gehörenden Diagramme in ihrer Gestalt sich ziemlich von den anderen unterscheiden. Die Abweichungen in der Gestalt der zu den Abschnitten ein und desselben Beines gehörenden gleichartigen Diagramme rühren nun zum Theil von dem Umstand her, dass die Bewegung der Beine nicht im strengen Sinne eine ebene ist, welche parallel der Gangebene stattfindet, zum grössten Theil sind sie aber Folge der gleichzeitigen Bewegung im Knie- und Fussgelenk.

Inwieweit die ebene Bewegung durch Seitenbewegung der einzelnen Körpertheile gestört wird, lässt sich aus den unteren Diagrammen der Tafeln V, VI und VII erkennen. Diese veranschaulichen, wie schon oben angedeutet wurde, für den ganzen Verlauf der Bewegung die Grösse des Winkels ψ, den die Projection einer jeden Längsaxe auf die zur Gangrichtung senkrechte Ebene mit der Verticalen bildet. Die Diagramme für die beiden ersten Versuche sagen nun unter anderem folgendes aus.

Der Oberschenkel eines Beines ist sowohl im Moment des Aufsetzens des letzteren auf den Boden, als auch schon kurze Zeit vorher und noch kurze Zeit hinterher mit seiner Längsaxe parallel der Gangebene; denn der Winkel ψ besitzt für diese Zeit mit grosser Annäherung den Werth Null. Bezeichnet man eine Neigung der Längsaxe eines Beinabschnittes gegen die Gangebene, bei welcher das distale Ende derselben weiter nach Aussen von der Gangebene absteht als das proximale, als „Neigung nach Aussen", und das umgekehrte Verhalten als „Neigung nach Innen", so kann man sagen, dass kurze Zeit nach dem Aufsetzen eines Beines sich der Oberschenkel zuerst ein wenig nach Aussen, dann aber nach Innen neigt. Die letztere Neigung nach Innen dauert fast während der ganzen Periode des Aufstehens an. Erst zuletzt, nur wenig Zeit vor dem Ablösen des Beines vom Boden, neigt sich der Oberschenkel nach Aussen und verharrt in dieser Neigung während der nun folgenden Periode des Schwingens bis kurz vor dem Aufsetzen, wo er, wie oben schon gesagt wurde, sich parallel der Gangebene einstellt.

Nahezu das gleiche Verhalten zeigt beim III. Versuch der linke Oberschenkel, während der rechte Oberschenkel hier im ganzen Verlaufe der Bewegung nach Aussen gegen die Gangebene geneigt ist. Im letzteren Falle entsprechen aber wenigstens die Aenderungen in der Grösse des Winkels ψ den seitlichen Bewegungen des rechten Oberschenkels bei den beiden anderen Versuchen.

Die Längsaxe des Unterschenkels (rothe Diagramme) zeigt in gewisser Beziehung genau das entgegengesetzte Verhalten gegenüber der Gangebene als die des Oberschenkels. Es zeigt sich zwar bei den beiden ersten Versuchen, dass dieselbe fast durchweg nach Innen geneigt ist, aber die Aenderungen des Winkels ψ ergeben Bewegungen der Projection der Unterschenkellängsaxe auf die zur Gangrichtung senkrechte Ebene, welche den entsprechenden Bewegungen der Oberschenkellängsaxe ziemlich genau entgegengesetzt sind. Nur beim III. Versuch zeigt sich wieder ein Unterschied sowohl im Verhalten des rechten Unterschenkels im Vergleich zu den beiden anderen Versuchen, als auch im Verhalten der beiden Beine zu einander. Die Bewegungen des linken Unterschenkels sind auch hier durchaus nicht entsprechend denen des rechten.

Was endlich die Fusslinie anlangt, so zeigen die blauen

Diagramme, dass dieselbe in allen Fällen fast im ganzen Verlaufe der Bewegung nach Aussen geneigt ist. Diese Neigung nach Aussen besitzt ein sehr stark ausgeprägtes Maximum, welches kurz vor dem Aufsetzen des betreffenden Fusses auf den Boden eintritt. Darauf nimmt die Neigung nach Aussen sehr schnell ab bis kurz vor dem Aufsetzen des Beines mit ganzer Sohle; von da an wird sie wieder etwas verstärkt, hält sich aber in dem ganzen weiteren Theile der Periode des Aufstehens in mässigen Grenzen. Während des Aufstehens mit ganzer Sohle ist sie nahezu constant, während des Abwickelns der Fusssohle vom Boden nimmt sie allmählich ab. Im Anfang der nun folgenden Periode des Schwingens nähert sich die Fusslinie schnell der Parallelstellung zur Gangebene, nimmt dann sogar für einige Zeit Neigung nach Innen an, durchläuft weiter eine Stellung, in der sie der Gangebene parallel ist, und wendet sich darauf wieder nach Aussen, um noch vor dem Aufsetzen des Beines das oben besprochene Maximum der Auswärtsneigung zu erreichen. Beim Gang mit Belastung zeigt der Fuss im Grossen und Ganzen das gleiche Verhalten wie bei den beiden ersten Versuchen.

Wie schon oben angedeutet wurde, werden die Abweichungen in der Gestalt der zu den Abschnitten eines Beines gehörenden Diagramme zum grössten Theil durch die Bewegungen im Knie- und Fussgelenk verursacht. Handelte es sich um ebene Bewegung, und fände die Bewegung aller Abschnitte genau parallel der Gangebene statt, so würde sich für jeden Moment die Gelenkstellung im Knie- und Fussgelenk leicht aus den oberen Diagrammen der Tafeln V, VI und VII ableiten lassen. Bezeichnet man als Gelenkwinkel denjenigen, welchen die Längsaxe des distalen der beiden durch das Gelenk verbundenen Glieder mit der Verlängerung der Längsaxe des proximalen Gliedes bildet, so lässt sich derselbe auch so gewinnen, dass man beide Längsaxen mit ihrem proximalen Ende nach ein und demselben Punkte verlegt, und den Winkel zwischen beiden misst. Da nun in den oberen Diagrammen die Ordinate dem Winkel zwischen der Projection einer Längsaxe auf die Gangebene und der Verticalen proportional ist, so wird der Gelenkwinkel im Falle ebener Bewegung für jeden, einem bestimmten Abscissenpunkte entsprechenden Moment durch den verticalen Abstand der zu den beiden betheiligten Gliedern gehörenden Diagramme an der betreffenden Stelle gemessen. Denn

dieser Abstand gibt den Unterschied der Neigung der Projectionen der beiden Längsaxen gegen die Verticale an und ist daher bei der ebenen Bewegung auch zugleich das Maass für den Winkel zwischen den Richtungen der beiden Längsaxen. So kann man also in den oberen Diagrammen aus dem verticalen Abstand der schwarzen und rothen Curve die Grösse des Kniegelenkwinkels, aus dem verticalen Abstand der rothen und blauen die des Fussgelenkwinkels für jeden Moment angeben, und aus der Aenderung der Grösse dieses Abstandes die Bewegungen in den betreffenden Gelenken erschliessen.

Da das schwarze Diagramm mit Ausnahme weniger Stellen über dem roten liegt, so bildet die Längsaxe des Oberschenkels in der Projection auf die Gangebene in den meisten Fällen einen grösseren Winkel nach vorn, bezüglich einen kleineren Winkel nach hinten mit der Verticalen als die Längsaxe des Unterschenkels. Das heisst aber, es ist das Kniegelenk meistens gebeugt. Nur kurz vor dem Aufsetzen des Beins und im Anfange der Periode des Abwickelns eines Fusses vom Boden reicht die rote Curve bis an die schwarze heran oder verläuft sogar etwas höher als diese. Dann liegen die beiden Längsaxen entweder in gerader Linie oder bilden einen nach vorn concaven stumpfen Winkel mit einander. Dieser letztere Fall ist sehr wohl möglich, denn infolge der weit nach hinten ausladenden Condylen des Oberschenkels liegt in der äussersten Streckstellung des Beins, bei der scheinbar der Unterschenkel einfach die geradlinige Fortsetzung des Oberschenkels bildet, die Axe des Kniegelenks, und damit der Mittelpunkt des Kniegelenks, hinter der geraden Verbindungslinie der Mittelpunkte des Hüft- und I. Fussgelenks. Es bildet daher in der Streckstellung des Kniegelenks und den benachbarten Gelenkstellungen die Verbindungslinie der Mittelpunkte des Hüft- und Kniegelenks, für welche der Name „Längsaxe des Oberschenkels“ eingeführt worden ist, mit der Verbindungslinie der Mittelpunkte des Knie- und I. Fussgelenks, also der Längsaxe des Unterschenkels, einen nach vorn concaven stumpfen Winkel. Ob der Winkel so gross werden kann, wie es beim III. Versuch für das rechte Bein der Fall zu sein scheint (vgl. die Diagramme auf Tafel VII), mag dahin gestellt bleiben. Es wäre nicht unmöglich, dass bei diesem Versuch die Stelle der am rechten Oberschenkel befestigten GEISSLER'schen

Röhre, welche in der Verlängerung der Knieaxe liegen sollte, durch eine kleine Verschiebung der Röhre kurz vor dem Versuch etwas zu weit nach hinten gekommen ist, so dass die Neigung der Oberschenkellängsaxe nach vorn etwas zu klein, die der Unterschenkellängsaxe dagegen etwas zu gross ausgefallen wäre. Der Umstand, dass im Vergleich zu allen anderen Diagrammen derselben Art das obere schwarze Diagramm auf der linken Seite der Tafel VII etwas zu weit nach unten und das zugehörige rothe Diagramm etwas zu weit nach oben verschoben erscheint, würde sich jedenfalls aus dieser Annahme sofort erklären. Wie dem auch sei, jedenfalls hätte eine solche unbeabsichtigte Rückwärtsverlegung des Mittelpunktes vom Kniegelenk, wie man sieht, keinen Einfluss auf die Gestalt, sondern nur einen Einfluss auf die Lage der Diagramme ausgeübt.

Will man die genauen Werthe des Gelenkwinkels unter der Voraussetzung ebener Bewegung ermitteln, so hat man nur die entsprechenden Werthe des Winkels φ für die benachbarten Längsaxen von einander abzuziehen. Es empfiehlt sich beim Kniegelenk als Minuend den Werth des zum Oberschenkel gehörenden Winkels φ, beim Fussgelenk dagegen den Werth des zum Fuss gehörenden Winkels φ zu verwenden, weil einerseits die schwarze Curve mit wenig Ausnahmen über der rothen, andererseits aber die rothe Curve durchweg unter der blauen liegt.

Die Werthe dieser Differenzen finden sich in den späteren Tabellen 5, 6 und 7 (S. 166 und 167), und zwar für die Kniegelenke in der 2. und 5., für die Fussgelenke in der 8. und 11. Spalte eingetragen.

Gleichzeitig sind den oberen Diagrammen für die Längsaxen auf den Tafeln V, VI und VII die beiden zu den Gelenkwinkeln gehörenden Diagramme hinzugefügt worden. Die letzteren sind, wie schon oben angedeutet wurde, zur Unterscheidung von den übrigen mit zwei Farben ausgezogen worden, nämlich immer mit den beiden Farben der durch das betreffende Gelenk verbundenen Körpertheile. Das schwarzrothe Diagramm gehört also zum Kniegelenk, das blaurothe zum Fussgelenk.

Aus den Diagrammen für das Kniegelenk erkennt man nun, zum Theil in Bestätigung der schon früher aus der Darstellung auf Tafel I abgeleiteten Resultate, unter anderem Folgendes. Das Kniegelenk ist immer am stärksten gestreckt einige Zeit vor dem

Aufsetzen des Beins. Es beugt sich dann schnell bis zum Aufsetzen, verringert darauf zunächst etwas oder arretirt sogar für kurze Zeit die Beugebewegung, um sie aber alsbald wieder mit der ursprünglichen Geschwindigkeit aufzunehmen und bis zu dem Moment fortzusetzen, in welchem sich der Fuss mit der ganzen Sohle auf den Boden aufgestellt hat.

Während der Periode des Aufstehens mit ganzer Sohle streckt sich darauf das Kniegelenk ununterbrochen, bis es am Ende derselben seine grösste Streckstellung nahezu wieder erreicht hat. In dem nun folgenden Zeitraum des Abwickelns des Fusses vom Boden findet wieder unausgesetzte Beugung des Kniegelenks statt, die auch noch bis weit in die Periode des Schwingens hinein fortgesetzt wird. Dann wird das Kniegelenk wieder stetig gestreckt bis zu dem oben schon erwähnten Moment grösster Streckung kurz vor dem erneuten Aufsetzen des Beins.

Das Fussgelenk führt im Verlauf eines Doppelschrittes Bewegungen von viel geringeren Dimensionen als das Kniegelenk aus, wie aus den blaurothen Diagrammen zu erkennen ist. Im Moment des Aufsetzens eines Beins mit der Hacke befindet es sich etwa in einer mittleren Beugestellung. Bis zu diesem Moment hat es für kurze Zeit eine geringe Dorsalflexion ausgeführt. Nun beginnt es Plantarflexion, welche aber bald wieder in Dorsalflexion übergeht, so dass das Fussgelenk im Moment des Aufsetzens des Fusses mit der ganzen Sohle nahezu wieder seine Mittelstellung eingenommen hat. Das letztere trifft beim rechten Fuss in den beiden ersten Versuchen ziemlich genau zu, beim linken Fuss ist die Mittelstellung bis dahin noch nicht ganz erreicht. In der nun folgenden Periode des Aufstehens des Fusses mit der ganzen Sohle wird das Fussgelenk unausgesetzt weiter dorsalflectirt. Diese Dorsalflexion dauert auch noch während des ersten Viertels der Periode des Abwickelns des Fusses vom Boden fort, dann wird sie aber von Plantarflexion abgelöst. Die letztere Plantarflexion hat in dem Moment ihr Ende, in dem das Bein sich vom Boden ablöst. Während der nun folgenden Periode des Schwingens wird das Fussgelenk im Grossen und Ganzen dorsalflectirt; es tritt zwar in der zweiten Hälfte dieser Periode einmal für kurze Zeit wieder Plantarflexion ein, dieselbe geht aber zuletzt wieder in Dorsalflexion über. Alle diese Flexionsbewegungen in der Periode des Schwingens finden verhältnissmässig langsam statt. —

Es ist wohl zu beachten, dass die Differenzen der zu benachbarten Gliedern gehörenden Werthe von φ und die Gelenkdiagramme nur die Gelenkstellung und die Gelenkbewegung in der Projection auf die Gangebene bestimmen. Die thatsächlich in den Gelenken stattfindenden Bewegungen und Stellungen sind damit noch nicht eindeutig festgestellt, weil die Bewegung der unteren Extremitäten nicht genau eben ist.

Man könnte nun auch hier die bisherige Untersuchung dadurch vervollständigen, dass man sich die entsprechenden Differenzen für die Winkel ψ verschaffte und die zugehörigen Diagramme zeichnete. Dann würde man die Projection der Gelenkbewegung auf die zur Gangrichtung senkrechte Ebene erhalten. Aus dieser, in Gemeinschaft mit der Projection auf die Gangebene, liesse sich dann die wirkliche Gelenkbewegung im Raume ableiten.

Dieser Weg ist nicht beschritten worden, einmal weil die Projection der Gelenkbewegung auf die zur Gangrichtung senkrechte Ebene stark hinter der Projection auf die Gangebene zurücktritt, und dann ausserdem, weil es immerhin nicht leicht ist, aus den Projectionen der Gelenkbewegung sich die letztere selbst in der Anschauung abzuleiten. Es ist vielmehr für die einzelnen Bewegungsphasen direct der Winkel β berechnet worden, den die Längsaxe des distalen Gliedes mit der Verlängerung der Längsaxe des proximalen Gliedes im Raume bildet, d. h. also der thatsächliche Werth des Gelenkwinkels im Raume.

Ableitung der Winkel des Kniegelenks und I. Fussgelenks.

Es ist von vornherein klar, dass der Gelenkwinkel β sich allein mit Hülfe der Winkel φ und ψ für die beiden durch das Gelenk verbundenen Glieder wird berechnen lassen; denn der Gelenkwinkel ist gegeben, wenn die Richtungen der Längsaxen der beiden Nachbarglieder bekannt sind; letztere sind aber eindeutig bestimmt durch die beiden Winkelcoordinaten φ und ψ. Es stellt sich aber heraus, dass die Formel, welche diese Berechnung ermöglicht, sich sehr unbequem für die praktische Ausführung gestaltet. Da nun andererseits schon früher die Werthe der Winkel α und ε für jede Längsaxe und jede Bewegungsphase berechnet worden sind (vgl. die Tabellen 2, 3 und 4), so empfiehlt es sich mehr, der Berechnung von β eine Formel zu Grunde zu legen, welche von diesen beiden anderen Winkelcoordinaten Gebrauch macht. Dieselbe gestaltet sich nämlich verhältnissmässig einfach und für die praktische Berechnung viel bequemer als die Formel, welche φ und ψ verwendet.

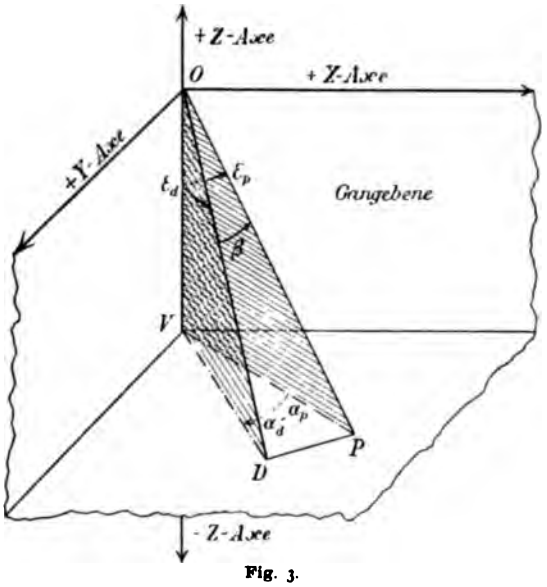


Fig. 3.

Zur Ableitung der nöthigen Formel denke man sich in der Figur 3 die Längsaxen der beiden durch das Gelenk verbundenen Glieder parallel nach dem Anfangspunkt O eines Coordinatensystems verlegt, welches dem bisher immer verwendeten System parallel liegt.

Durch einen Punkt V der negativen Z-Axe sei eine horizontale, also der XY-Ebene parallele Ebene gelegt, welche die proximale Längsaxe im Punkte P und die distale im Punkte D schneiden möge. Der Winkel, welchen die proximale Längsaxe mit der Verticalen bildet, sei mit ε_p, und der entsprechende Winkel der distalen Längsaxe mit ε_d bezeichnet. Ferner seien α_p und α_d die Winkel, welche die Verticalebene durch die proximale Längsaxe und die Verticalebene durch die distale Längsaxe mit dem nach vorn gerichteten Theil der Gangebene bilden. Bezeichnet man endlich noch mit β den Gelenkwinkel, also den Winkel zwischen den beiden von O ausgehenden Längsaxen, so ist in Figur 3

$$\sphericalangle VOP = \varepsilon_p;\ \sphericalangle VOD = \varepsilon_d;\ \sphericalangle DVP = \alpha_d - \alpha_p \text{ und } \sphericalangle DOP = \beta.$$

Da $\sphericalangle DVP$ den Winkel darstellt, welchen die Ebenen der beiden Dreiecke VOD und VOP mit einander bilden, so besteht nach einem bekannten Satze der sphärischen Trigonometrie zwischen β und den drei Winkeln ε_p; ε_d; $\alpha_d - \alpha_p$ die Relation:

$$\cos\beta = \cos\varepsilon_d \cos\varepsilon_p + \sin\varepsilon_d \sin\varepsilon_p \cos(\alpha_d - \alpha_p).$$

Mit Hülfe dieser Formel sind nun für alle 31 Bewegungsphasen eines jeden der drei Versuche die Werthe des Kniegelenkwinkels $\beta_{2,4}$ resp. $\beta_{3,5}$ und die des Fussgelenkwinkels $\beta_{4,6}$ resp. $\beta_{5,7}$ berechnet und in den umstehenden Tabellen 5, 6 und 7 (S. 166 und 167) niedergelegt worden. Zugleich finden sich in diesen Tabellen die zugehörigen Werthe der Differenzen $\alpha_d - \alpha_p$ mit angegeben.

Ein Vergleich der Werthe von β mit den ebenfalls in der Tabelle niedergelegten zugehörigen Werthen des Winkels, welcher gleich der Differenz zweier benachbarter Winkel φ ist, zeigt nun, dass zwischen beiden kein sehr grosser Unterschied besteht. Dies ist dem Umstande zu verdanken, dass die Bewegung der unteren Extremitäten beim Gehen nahezu parallel der Gangebene vor sich geht. Würde das letztere genau stattfinden, so müssten beide Winkel direct mit einander übereinstimmen, denn die Differenzen der benachbarten Winkelcoordinaten φ stellen ja nichts anderes dar als die Gelenkwinkel in der Projection auf die Gangebene. Bei einer Bewegung, bei der alle Längsaxen fortwährend der Gangebene parallel bleiben, ist aber die Projectionsbewegung von der wirklichen Bewegung nicht mehr verschieden. Man kann daher als annähernd richtige Veranschaulichung der Werthe der wirk-

Nr.	Kniegelenk rechts			Kniegelenk links			I. Fussgelenk rechts			I. Fussgelenk links		
	$\alpha_4-\alpha_2$	$\varphi_2-\varphi_4$	$\beta_{2,4}$	$\alpha_3-\alpha_2$	$\varphi_2-\varphi_3$	$\beta_{2,3}$	$\alpha_6-\alpha_4$	$\varphi_6-\varphi_4$	$\beta_{4,6}$	$\alpha_7-\alpha_5$	$\varphi_7-\varphi_5$	$\beta_{5,7}$
1	+ 93° 0′	+56° 46′	+57° 48′	+ 70° 4′	+14° 30′	+16° 1′	− 1° 26′	33° 55′	34° 2′	− 79° 13′	40° 27′	42° 23′
2	+147° 56′	+59° 12′	+59° 58′	+ 88° 32′	+10° 35′	+12° 47′	− 2° 11′	37° 22′	37° 30′	− 97° 33′	42° 33′	44° 31′
3	+167° 31′	+56° 45′	+57° 29′	+ 98° 33′	+ 6° 8′	+ 8° 40′	− 32° 34′	40° 44′	41° 6′	−114° 0′	44° 8′	45° 55′
4	+176° 50′	+50° 22′	+51° 1′	− 28° 11′	+ 1° 30′	+ 4° 54′	−175° 33′	42° 17′	42° 49′	−129° 15′	45° 15′	46° 45′
5	−173° 52′	+40° 53′	+41° 29′	− 27° 29′	− 1° 54′	− 3° 38′	+174° 48′	43° 44′	44° 25′	−147° 50′	46° 24′	47° 49′
6	−132° 20′	+28° 57′	+29° 34′	− 17° 44′	− 3° 51′	− 4° 27′	+132° 48′	42° 38′	43° 15′	−162° 39′	48° 26′	49° 55′
7	− 12° 36′	+13° 55′	+14° 20′	− 9° 54′	− 4° 16′	− 4° 31′	+ 15° 56′	40° 18′	40° 53′	−173° 31′	50° 38′	52° 11′
8	+ 1° 7′	+ 0° 13′	+ 0° 31′	− 6° 7′	− 3° 27′	− 3° 43′	+ 8° 21′	39° 1′	39° 40′	+179° 34′	50° 59′	52° 28′
9	+ 0° 41′	− 0° 28′	− 0° 38′	− 5° 38′	− 0° 35′	− 2° 15′	+ 12° 13′	39° 22′	40° 42′	+175° 54′	50° 59′	52° 14′
10	− 8° 14′	+10° 40′	+11° 2′	− 7° 38′	+ 4° 51′	+ 6° 12′	+ 19° 47′	42° 19′	44° 9′	+172° 31′	48° 55′	49° 55′
11	− 14° 29′	+13° 6′	+13° 43′	− 12° 16′	+12° 30′	+14° 3′	+ 21° 27′	33° 30′	34° 48′	+164° 34′	41° 34′	42° 7′
12	− 47° 57′	+22° 5′	+23° 33′	− 21° 51′	+25° 27′	+27° 27′	+ 48° 51′	35° 39′	36° 52′	+ 1° 41′	31° 15′	31° 30′
13	− 95° 26′	+27° 24′	+28° 35′	− 35° 48′	+40° 37′	+42° 19′	+101° 3′	40° 40′	42° 27′	+ 8° 36′	32° 9′	32° 43′
14	−112° 2′	+23° 18′	+24° 45′	− 69° 14′	+49° 32′	+51° 0′	+118° 22′	42° 3′	43° 59′	+ 7° 20′	34° 2′	34° 28′
15	−117° 14′	+17° 23′	+18° 31′	−129° 50′	+51° 1′	+52° 24′	+129° 15′	42° 41′	44° 32′	+ 3° 46′	37° 40′	37° 57′
16	−114° 8′	+11° 50′	+12° 29′	−155° 4′	+47° 49′	+49° 15′	+140° 26′	43° 6′	44° 48′	−147° 51′	39° 42′	40° 0′
17	− 68° 38′	+ 7° 19′	+ 7° 42′	−173° 52′	+42° 50′	+44° 14′	+152° 36′	44° 6′	45° 39′	−175° 43′	42° 13′	42° 57′
18	− 3° 13′	+ 3° 28′	+ 3° 48′	+172° 11′	+35° 20′	+36° 34′	+162° 55′	46° 1′	47° 31′	−170° 38′	44° 3′	45° 13′
19	+ 4° 3′	+ 0° 51′	+ 1° 26′	+104° 3′	+23° 51′	+25° 0′	+171° 5′	48° 6′	49° 31′	−104° 38′	43° 50′	44° 58′
20	− 0° 25′	+ 0° 39′	+ 0° 38′	+ 14° 9′	+ 8° 5′	+ 9° 12′	+179° 27′	50° 26′	51° 40′	− 16° 40′	42° 48′	43° 38′
21	+ 0° 3′	+ 0° 38′	+ 0° 43′	+ 1° 11′	− 6° 38′	− 6° 38′	−175° 22′	51° 10′	52° 28′	− 10° 23′	42° 35′	43° 29′
22	+ 1° 27′	+ 3° 21′	+ 3° 29′	− 0° 19′	− 7° 22′	− 7° 22′	−170° 47′	50° 22′	51° 37′	− 11° 58′	42° 35′	43° 48′
23	+ 4° 9′	+ 9° 16′	+ 9° 38′	+ 7° 52′	+ 5° 7′	+ 5° 53′	−163° 5′	47° 20′	48° 34′	− 17° 39′	45° 6′	46° 37′
24	+ 10° 49′	+17° 15′	+18° 17′	+ 10° 42′	+ 3° 56′	+ 5° 16′	−114° 4′	40° 11′	41° 31′	− 16° 22′	33° 24′	34° 29′
25	+ 21° 39′	+30° 58′	+32° 34′	+ 22° 2′	+10° 8′	+11° 18′	− 23° 43′	33° 7′	34° 38′	− 22° 10′	34° 29′	34° 57′
26	+ 38° 36′	+48° 16′	+49° 28′	+ 56° 22′	+17° 6′	+18° 24′	− 8° 48′	32° 43′	33° 23′	− 58° 51′	37° 39′	38° 49′
27	+ 94° 58′	+56° 35′	+57° 24′	+ 84° 43′	+14° 30′	+15° 50′	+ 3° 16′	34° 49′	34° 45′	− 87° 49′	40° 23′	41° 30′
28	+157° 18′	+57° 58′	+58° 45′	+111° 20′	+10° 42′	+12° 19′	+ 7° 25′	37° 43′	37° 39′	−114° 38′	42° 22′	43° 34′
29	+173° 9′	+54° 51′	+55° 38′	+125° 45′	+ 6° 46′	+ 8° 11′	+ 32° 11′	41° 7′	41° 19′	−137° 13′	43° 36′	44° 43′
30	−178° 16′	+49° 20′	+50° 12′	− 27° 57′	+ 3° 11′	+ 5° 6′	+174° 23′	43° 45′	44° 21′	−151° 33′	44° 39′	45° 45′
31	−169° 41′	+40° 8′	+41° 11′	− 23° 52′	+ 0° 28′	+ 3° 47′	+169° 49′	44° 15′	45° 20′	−161° 54′	46° 7′	47° 18′

II. Versuch.

Tabelle 6.

Nr.	Kniegelenk rechts			Kniegelenk links			I. Fussgelenk rechts			I. Fussgelenk links		
	$\alpha_4-\alpha_2$	$\varphi_2-\varphi_4$	$\beta_{2,4}$	$\alpha_3-\alpha_2$	$\varphi_2-\varphi_3$	$\beta_{2,3}$	$\alpha_6-\alpha_4$	$\varphi_6-\varphi_4$	$\beta_{4,6}$	$\alpha_7-\alpha_5$	$\varphi_7-\varphi_5$	$\beta_{5,7}$
1	+ 34° 44′	+38° 43′	+40° 50′	+ 39° 8′	+17° 27′	+18° 24′	− 15° 59′	30° 46′	32° 13′	− 44° 40′	37° 7′	38° 24′
2	+ 52° 47′	+50° 33′	+52° 9′	+ 69° 50′	+18° 18′	+19° 28′	− 8° 21′	33° 42′	34° 23′	− 75° 50′	40° 46′	42° 16′
3	+112° 37′	+55° 53′	+57° 5′	+ 97° 41′	+15° 39′	+17° 14′	+ 3° 30′	35° 11′	35° 8′	−102° 31′	43° 4′	44° 33′
4	+161° 53′	+56° 40′	+57° 45′	+114° 28′	+11° 30′	+13° 6′	+ 4° 29′	38° 37′	38° 46′	−121° 46′	44° 42′	46° 5′
5	+174° 21′	+53° 2′	+54° 6′	+112° 46′	+ 6° 46′	+ 8° 30′	+165° 17′	41° 11′	41° 35′	−134° 57′	45° 39′	46° 51′
6	−177° 6′	+45° 54′	+46° 54′	− 22° 26′	+ 1° 58′	+ 4° 21′	+174° 34′	42° 33′	43° 21′	−146° 37′	46° 38′	47° 43′
7	−160° 48′	+34° 31′	+35° 29′	− 19° 7′	− 0° 46′	− 3° 16′	+161° 29′	42° 48′	43° 50′	−157° 58′	48° 48′	49° 48′
8	− 45° 39′	+21° 18′	+22° 14′	− 12° 35′	− 2° 9′	− 3° 14′	+ 46° 14′	41° 21′	42° 11′	−166° 49′	51° 19′	52° 20′
9	− 4° 30′	+ 4° 2′	+ 4° 25′	− 7° 31′	− 2° 48′	− 3° 17′	+ 9° 34′	38° 13′	38° 48′	−174° 0′	52° 20′	53° 17′
10	+ 0° 28′	− 3° 30′	− 3° 30′	− 5° 38′	− 1° 0′	− 2° 9′	+ 11° 57′	38° 10′	39° 30′	−179° 28′	53° 43′	54° 41′
11	− 6° 44′	+ 6° 55′	+ 7° 23′	− 6° 59′	+ 4° 29′	+ 5° 37′	+ 19° 46′	40° 0′	42° 15′	+179° 16′	50° 40′	51° 21′
12	− 15° 21′	+13° 47′	+14° 25′	− 10° 41′	+11° 31′	+12° 48′	+ 24° 39′	38° 4′	39° 46′	+179° 29′	45° 19′	45° 44′
13	− 35° 8′	+17° 39′	+19° 6′	− 20° 14′	+23° 46′	+25° 34′	+ 40° 45′	34° 12′	36° 6′	− 8° 17′	34° 2′	34° 5′
14	− 79° 30′	+25° 53′	+26° 59′	− 31° 42′	+38° 59′	+40° 24′	+ 84° 37′	39° 42′	34° 35′	+ 3° 30′	32° 36′	32° 50′
15	−104° 21′	+24° 23′	+25° 22′	− 73° 55′	+51° 9′	+52° 18′	+113° 5′	41° 36′	43° 22′	+ 2° 39′	33° 31′	33° 41′
16	−116° 32′	+20° 19′	+21° 7′	−134° 46′	+53° 32′	+54° 43′	+128° 58′	43° 25′	45° 3′	− 1° 27′	36° 28′	36° 34′
17	−119° 27′	+15° 9′	+15° 51′	−160° 25′	+50° 54′	+52° 13′	+139° 51′	44° 43′	46° 15′	− 58° 32′	38° 59′	39° 6′
18	− 93° 24′	+ 9° 51′	+10° 16′	−173° 20′	+45° 22′	+46° 48′	+150° 28′	45° 24′	46° 51′	−167° 55′	40° 57′	41° 20′
19	− 13° 18′	+ 5° 35′	+ 5° 55′	+173° 18′	+36° 49′	+38° 11′	+159° 52′	46° 40′	48° 4′	−167° 31′	43° 11′	44° 2′
20	+ 1° 58′	+ 2° 35′	+ 2° 56′	+111° 25′	+24° 54′	+26° 6′	+167° 28′	48° 43′	50° 4′	−110° 20′	43° 30′	44° 29′
21	+ 1° 18′	+ 1° 9′	+ 1° 21′	+ 16° 1′	+ 9° 43′	+10° 47′	+174° 23′	50° 26′	51° 41′	− 19° 8′	43° 38′	44° 35′
22	+ 0° 32′	+ 1° 24′	+ 1° 28′	+ 2° 31′	− 5° 24′	− 5° 29′	−178° 55′	51° 34′	52° 59′	− 10° 1′	42° 26′	43° 12′
23	+ 2° 44′	+ 4° 55′	+ 5° 15′	+ 0° 16′	− 6° 15′	− 6° 16′	−176° 36′	51° 1′	52° 12′	− 13° 44′	44° 10′	45° 33′
24	+ 5° 14′	+11° 30′	+12° 2′	+ 10° 3′	+ 5° 35′	+ 6° 35′	−168° 3′	47° 18′	48° 34′	− 20° 20′	45° 35′	47° 13′
25	+ 10° 51′	+20° 18′	+21° 15′	+ 12° 29′	+ 4° 8′	+ 5° 41′	−106° 33′	40° 2′	41° 4′	− 14° 36′	35° 44′	36° 4′
26	+ 23° 22′	+34° 53′	+36° 24′	+ 30° 12′	+12° 43′	+14° 3′	− 11° 33′	32° 22′	33° 13′	− 31° 13′	38° 4′	38° 37′
27	+ 47° 0′	+51° 45′	+52° 45′	+ 61° 3′	+17° 35′	+18° 52′	− 1° 24′	33° 57′	34° 5′	− 64° 37′	40° 5′	41° 9′
28	+133° 19′	+60° 6′	+60° 46′	+ 88° 41′	+16° 4′	+17° 31′	+ 5° 33′	35° 16′	35° 9′	− 93° 41′	42° 55′	44° 6′
29	+162° 21′	+60° 55′	+61° 37′	+106° 26′	+12° 25′	+13° 46′	+ 8° 15′	38° 3′	37° 59′	−115° 58′	45° 4′	46° 12′
30	+170° 50′	+57° 22′	+58° 7′	+105° 13′	+ 8° 11′	+ 9° 26′	+ 27° 23′	41° 17′	41° 27′	−132° 33′	46° 19′	47° 24′
31	+177° 23′	+50° 13′	+51° 1′	− 1° 48′	+ 4° 25′	+ 6° 3′	−179° 12′	42° 34	43° 9′	−144° 11′	47° 26′	48° 30′

Nr.	Kniegelenk						I. Fussgelenk						Nr.
	rechts			links			rechts			links			
	$\alpha_4-\alpha_2$	$\varphi_2-\varphi_4$	$\beta_{2,4}$	$\alpha_5-\alpha_3$	$\varphi_3-\varphi_5$	$\beta_{3,5}$	$\alpha_6-\alpha_4$	$\varphi_4-\varphi_6$	$\beta_{4,6}$	$\alpha_7-\alpha_5$	$\varphi_5-\varphi_7$	$\beta_{5,7}$	
1	+116° 3′	+45° 34′	+46° 8′	+114° 58′	+13° 57′	+14° 9′	+ 12° 35′	33° 48′	33° 45′	−138° 7′	45° 24′	46° 52′	1
2	+158° 24′	+42° 29′	+43° 8′	+117° 8′	+10° 15′	+10° 27′	+129° 6′	36° 28′	36° 27′	−152° 46′	47° 4′	48° 26′	2
3	+169° 53′	+36° 24′	+37° 18′	+ 53° 53′	+ 7° 5′	+ 7° 15′	+167° 54′	39° 3′	39° 6′	−164° 27′	48° 48′	51° 51′	3
4	+179° 56′	+26° 50′	+27° 48′	+ 3° 22′	+ 4° 24′	+ 4° 34′	+166° 9′	39° 28′	39° 35′	−172° 43′	50° 52′	52° 10′	4
5	− 17° 4′	+13° 35′	+14° 22′	− 2° 55′	+ 2° 22′	+ 2° 38′	+ 6° 42′	38° 15′	38° 19′	−178° 43′	52° 44′	54° 1′	5
6	− 5° 42′	− 1° 50′	− 2° 29′	− 2° 45′	+ 0° 46′	+ 1° 9′	− 0° 38′	36° 39′	36° 40′	+177° 42′	54° 57′	56° 7′	6
7	+ 0° 9′	−14° 14′	−14° 22′	− 3° 14′	+ 1° 27′	+ 1° 52′	− 1° 3′	36° 38′	36° 30′	+175° 57′	56° 35′	57° 35′	7
8	+ 0° 32′	−11° 14′	−11° 21′	− 3° 50′	+ 3° 50′	+ 4° 13′	+ 1° 6′	37° 24′	37° 24′	+172° 7′	52° 48′	53° 40′	8
9	− 6° 1′	− 1° 7′	− 2° 30′	− 6° 14′	+ 8° 27′	+ 9° 0′	+ 2° 51′	36° 9′	36° 19′	+169° 16′	48° 26′	49° 3′	9
10	− 8° 47′	− 2° 7′	− 3° 30′	− 11° 19′	+17° 48′	+18° 36′	+ 0° 44′	25° 46′	25° 49′	+164° 33′	42° 10′	42° 25′	10
11	− 15° 51′	+ 5° 54′	+ 7° 42′	− 23° 47′	+33° 46′	+34° 54′	+ 6° 15′	29° 1′	29° 9′	+ 6° 35′	35° 50′	36° 5′	11
12	− 27° 23′	+11° 38′	+12° 54′	− 42° 11′	+50° 0′	+50° 40′	+ 18° 54′	33° 50′	34° 7′	+ 9° 28′	38° 17′	38° 37′	12
13	− 36° 2′	+ 7° 16′	+ 8° 36′	−119° 28′	+58° 19′	+58° 51′	+ 25° 27′	35° 13′	35° 30′	+ 11° 51′	41° 6′	41° 29′	13
14	− 52° 18′	+ 0° 54′	+ 3° 55′	−160° 47′	+59° 14′	+60° 4′	+ 24° 21′	36° 22′	36° 32′	+ 15° 21′	42° 47′	43° 18′	14
15	−161° 7′	− 3° 55′	− 4° 52′	−174° 19′	+56° 24′	+57° 32′	+ 31° 1′	37° 31′	37° 45′	+176° 32′	45° 4′	45° 44′	15
16	+ 62° 44′	− 6° 25′	− 6° 53′	+177° 32′	+49° 40′	+50° 55′	+135° 50′	39° 20′	39° 28′	−178° 40′	47° 27′	48° 45′	16
17	+ 20° 44′	− 9° 10′	− 9° 30′	+167° 21′	+39° 20′	+40° 42′	+177° 7′	41° 28′	41° 53′	−170° 0′	48° 0′	49° 46′	17
18	+ 10° 33′	−11° 53′	−12° 5′	+116° 52′	+26° 7′	+27° 32′	−174° 7′	43° 40′	44° 6′	−116° 56′	48° 32′	49° 51′	18
19	+ 5° 14′	−12° 5′	−12° 13′	+ 15° 15′	+ 9° 29′	+10° 39′	−169° 3′	45° 25′	45° 51′	− 16° 54′	48° 27′	49° 19′	19
20	+ 4° 1′	−11° 21′	−11° 29′	− 2° 46′	− 4° 58′	− 5° 10′	−166° 6′	46° 57′	47° 20′	− 5° 33′	46° 34′	46° 55′	20
21	+ 4° 23′	− 8° 42′	− 8° 58′	− 1° 52′	− 5° 1′	− 5° 6′	−163° 46′	46° 17′	46° 35′	− 8° 17′	47° 26′	48° 6′	21
22	+ 6° 58′	− 2° 37′	− 4° 12′	+ 0° 44′	+ 2° 6′	+ 2° 9′	−160° 26′	43° 21′	43° 32′	− 10° 14′	46° 11′	47° 3′	22
23	+ 10° 14′	+ 5° 55′	+ 7° 17′	+ 11° 47′	+ 5° 25′	+ 6° 27′	−131° 54′	35° 25′	35° 32′	− 15° 25′	37° 36′	38° 27′	23
24	+ 18° 56′	+19° 51′	+20° 50′	+ 25° 38′	+12° 2′	+12° 53′	− 18° 34′	27° 4′	27° 20′	− 25° 25′	38° 34′	39° 0′	24
25	+ 30° 27′	+35° 16′	+35° 50′	+ 64° 57′	+15° 33′	+16° 21′	− 6° 10′	27° 48′	27° 52′	− 68° 27′	40° 59′	41° 54′	25
26	+ 61° 36′	+43° 35′	+44° 5′	+107° 52′	+13° 50′	+14° 28′	+ 2° 24′	29° 22′	29° 21′	−114° 14′	43° 13′	44° 6′	26
27	+123° 12′	+44° 19′	+44° 56′	+124° 24′	+ 9° 21′	+10° 4′	+ 7° 50′	32° 4′	32° 3′	−133° 37′	44° 12′	45° 5′	27
28	+159° 35′	+41° 47′	+42° 38′	+102° 28′	+ 5° 13′	+ 5° 58′	+129° 39′	34° 21′	34° 27′	−148° 1′	45° 0′	45° 50′	28
29	+177° 43′	+35° 33′	+36° 40′	− 9° 48′	+ 2° 10′	+ 2° 55′	+161° 49′	36° 13′	36° 24′	−161° 54′	46° 26′	47° 18′	29
30	−156° 47′	+26° 1′	+27° 36′	− 8° 51′	− 0° 6′	− 1° 27′	+144° 34′	36° 17′	36° 37′	−170° 20′	47° 56′	48° 49′	30
31	− 52° 12′	+14° 4′	+16° 3′	− 6° 39′	− 1° 0′	− 1° 36′	+ 44° 55′	36° 21′	36° 41′	−175° 34′	50° 34′	51° 30′	31

lichen Gelenkwinkel die schon weiter oben discutirten Gelenkdiagramme auf den Tafeln V, VI und VII verwenden. Hat man dagegen für eine weitergehende Untersuchung die Gelenkwinkel als Grundlage zu nehmen, so darf man natürlich nicht auf die genannten Diagramme zurückgreifen, sondern muss die in den obigen Tabellen niedergelegten genauen Werthe der Winkel β verwenden.

Rückblick.

Die vorliegende Abhandlung gibt zunächst einen Ausblick auf die weiter anzustellenden Untersuchungen über den Gang des Menschen. Dieselben steuern schliesslich alle dem gleichen Endziele zu, die Rolle aufzudecken, welche den einzelnen Muskeln bei der Hervorbringung der Bewegungen des Gehens zugetheilt ist. Um diesem Endziel näher zu kommen, muss zuerst eine eingehende Kenntniss des wechselnden Bewegungszustandes des menschlichen Körpers für den ganzen Verlauf eines Doppelschrittes erworben werden. Dann erst kann man hoffen, mit Hülfe der Differentialgleichungen der Bewegung das Ziel zu erreichen.

Die Bewegungsgleichungen des menschlichen Körpers besitzen zwar eine sehr verwickelte Form. Sie lassen aber, wie in einem ersten Abschnitt der Arbeit ausführlich auseinandergesetzt worden ist, eine für die weitere Untersuchung sehr werthvolle und verhältnissmässig einfache Interpretation zu, welche nicht nur volles Licht auf die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Körpertheile in ihren Bewegungen wirft, sondern auch vor allen Dingen gestattet, die Gleichungen selbst im gegebenen Falle ohne Mühe hinzuschreiben.

Die übrigen Abschnitte der Abhandlung liefern einen weiteren Beitrag zur Kenntniss der beim Gange des Menschen befolgten Bewegungsgesetze, indem sie sich mit der Bewegung der unteren Extremitäten beschäftigen.

Die Möglichkeit, ohne neue Versuche den Ablauf der Bewegungen der verschiedenen Glieder bis ins Einzelnste darzustellen, ist durch die im I. Theil ausführlich beschriebene Beziehung des ganzen Bewegungsvorganges auf ein rechtwinkliges räumliches Coordinatensystem gegeben. Während im I. Theil die Bahncurven der verschiedenen Gelenkmittelpunkte und einiger anderer für das Gehen wichtiger Punkte des menschlichen Körpers, und im II. Theil die Bahn des Gesammtschwerpunktes mit den zugehörigen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen abgeleitet worden sind, gibt

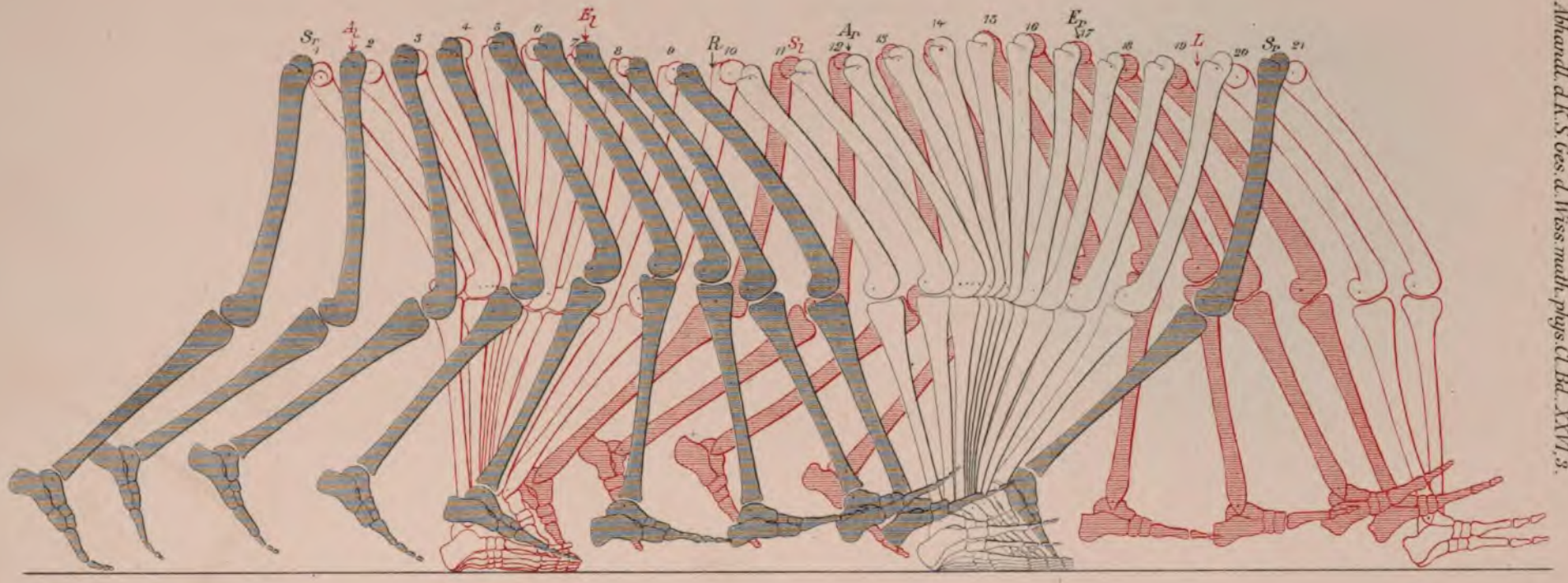
der vorliegende III. Theil einen Ueberblick über das Verhalten der unteren Extremitäten im Verlauf eines Doppelschrittes. Es finden sich zunächst sowohl die Drehungen abgeleitet, welche die drei Abschnitte der Beine in der Projection des ganzen Bewegungsvorganges auf die Gangebene ausführen, als auch die damit im Zusammenhang stehenden gleichzeitigen Bewegungen in den Knie- und Fussgelenken.

Ein Vergleich der gewonnenen Resultate mit der Darstellung der successiven Stellungen der Beine, welche die Brüder Wilhelm und Eduard Weber in ihrer Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge gegeben haben, zeigt, dass die Weber'schen Anschauungen sich angesichts der durch die Momentphotographie aufgedeckten Thatsachen nicht mehr halten lassen. Insbesondere ergibt sich, dass die drei Principien, welche für die beiden Forscher die Grundlage zu ihrer Theorie des Gehens abgegeben haben, auch nicht annähernd erfüllt sind. Die Brüder Weber hielten es im Interesse eines regelmässigen Ganges für absolut nothwendig, dass das vorn aufgesetzte Bein in demselben Moment senkrecht steht, in welchem das hintere Bein sich vom Boden ablöst, um seine Schwingung nach vorn zu beginnen (Princip der anfänglichen Stellung). In Wirklichkeit trifft aber in diesem Moment die Verticale, welche man durch den Mittelpunkt des Hüftgelenks des vorderen Beins gelegt denkt, den Fussboden weit hinter dem aufgesetzten Fuss; sie liegt sogar näher an der Fussspitze des hinteren als an der des vorderen Beines. Ferner nahmen die Brüder Weber an, dass die Streckkraft des aufgesetzten Beins, in verticaler Richtung geschätzt, immer gleich dem Gewicht des Körpers sei (Princip des Maasses der Anstrengung). Es hat sich jedoch herausgestellt, dass diese verticale Componente der Streckkraft theils bis unter die Hälfte des Gewichts herabsinkt, theils um etwa die Hälfte des Gewichts das letztere übertrifft. Auch die Gültigkeit des dritten Princips, welches behauptet, dass die Richtung des Druckes, den wir mit dem aufgesetzten Fuss gegen den Boden ausüben, immer durch den Schwerpunkt des Körpers hindurchgeht (Princip der Richtung der Streckung), lässt sich nicht erweisen.

Alle drei Grundprincipien der Brüder Weber entsprechen dem idealen Falle einer geradlinigen horizontalen Bewegung des Gesammtschwerpunktes mit constanter Geschwindigkeit, während der

Schwerpunkt in Wirklichkeit eine doppelt gekrümmte Bahn mit theils beschleunigter, theils verzögerter Bewegung durchläuft. Diese Kenntniss der genauen Bewegung des Schwerpunktes konnten die Brüder Weber aber mit ihren geringen Hülfsmitteln nicht erwerben. Es fehlte ihnen vor allen Dingen die der Forschung auf dem Gebiete der Bewegungsphysiologie so grosse Dienste leistende Momentphotographie, um die successiven Bewegungsphasen direct fixiren zu können. Wenn nun mit den drei Grundpfeilern für die Weber'sche Theorie des Gehens auch die letztere selbst ihre strenge Gültigkeit verliert, so kann dadurch jedoch die Bedeutung der „Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge" für die Wissenschaft nicht herabgemindert werden. Dieselbe ist und bleibt für alle Zeiten ein classisches Werk, welches den Anfang einer exacten Forschung auf dem Gebiete der Bewegungsphysiologie bildet.

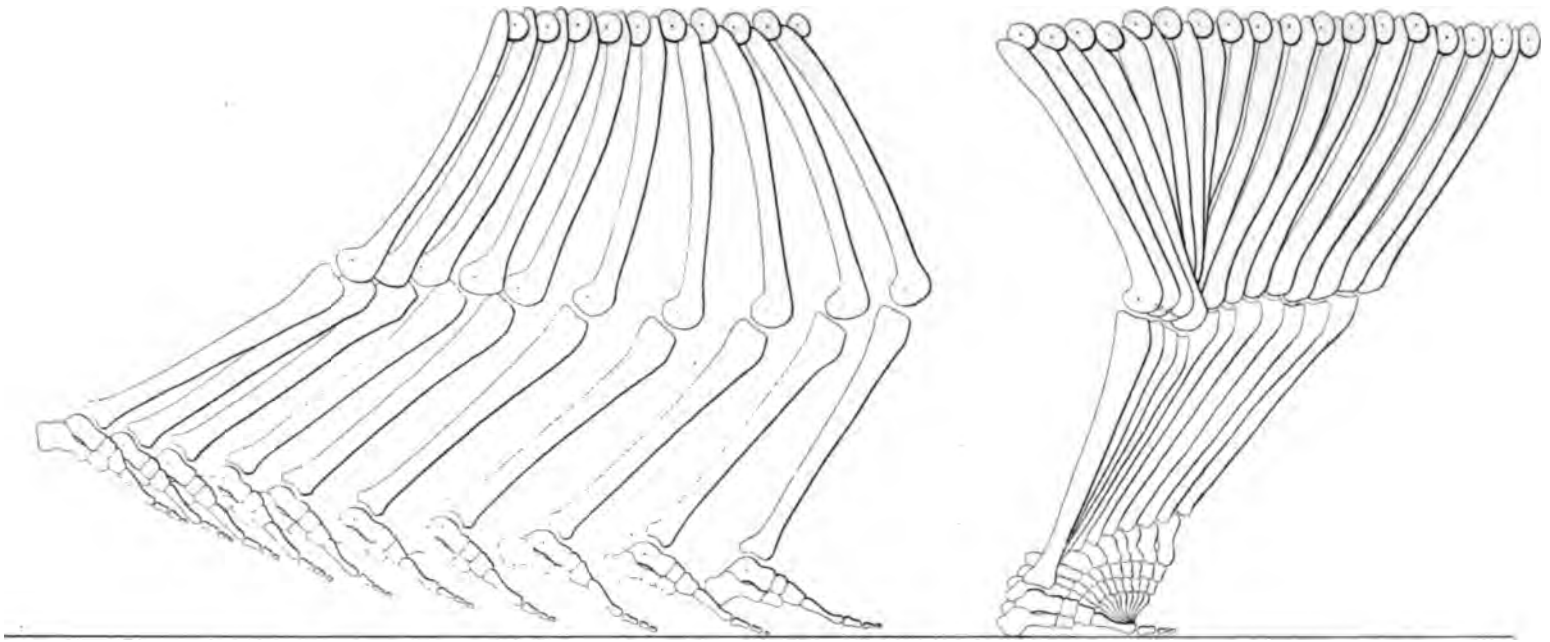
Durch die Darstellung des Bewegungsvorganges in der Projection auf die Gangebene ist zunächst nur ein Ueberblick über die Aufeinanderfolge der Stellungen der unteren Extremitäten und der zugehörigen Gelenkbewegungen, aber noch nicht das ausreichende Fundament für die weitere Analyse der Beinbewegungen gewonnen. Für diesen Zweck, insbesondere für die Ableitung der Winkelgeschwindigkeiten und Winkelbeschleunigungen, mit denen die einzelnen Abschnitte der Beine im Raume ihre Richtung ändern, muss man die genauen Werthe von Winkelcoordinaten kennen, durch welche die Stellung eines jeden Körpertheils im Raume eindeutig bestimmt wird. Hierzu reicht infolge des Zusammenhanges der einzelnen Glieder die Angabe zweier Winkel für jeden Körpertheil aus. In der Arbeit finden sich nun für alle durch die Photographie fixirten Bewegungsphasen der drei Versuche die Werthe der Winkel berechnet, welche die Projectionen der Längsaxen der einzelnen Abschnitte der Beine auf die Gangebene und die zur Gangrichtung senkrechte Ebene mit der nach unten gerichteten Verticalen bilden. Ferner sind auch die Werthe der Gelenkwinkel sowohl für das Kniegelenk wie für das I. Fussgelenk, d. h. also der Winkel, welche in den einzelnen Bewegungsphasen die Längsaxe des distalen mit der Verlängerung der Längsaxe des proximalen der beiden durch das betreffende Gelenk verbundenen Glieder im Raume bildet, berechnet worden.



Successive Stellungen der beiden Beine im Verlauf eines Doppelschrittes (Das rechte Bein ist schwarz, das linke roth gezeichnet Die Bewegungphasen, welche der Periode des Schwingens eines Beins angehören, sind durch Schraffirung vor den anderen hervorgehoben worden. Das Intervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Phasen beträgt genau den 10ten Theil der Dauer eines einfachen Schrittes.)

Periode des Schwingens

Periode des Aufstehens.



Successive Stellungen des rechten Beins im Verlauf eines Doppelschrittes nach Angabe der Brüder Weber.

(Genaue Copie der Figur 3 auf Tafel XII der Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge.)

I. Versuch.

Bewegung des rechten Fußes während der Periode des Aufstehens. (Projection auf die Gangebene.)

(natürliche Größe.)

II. Versuch.

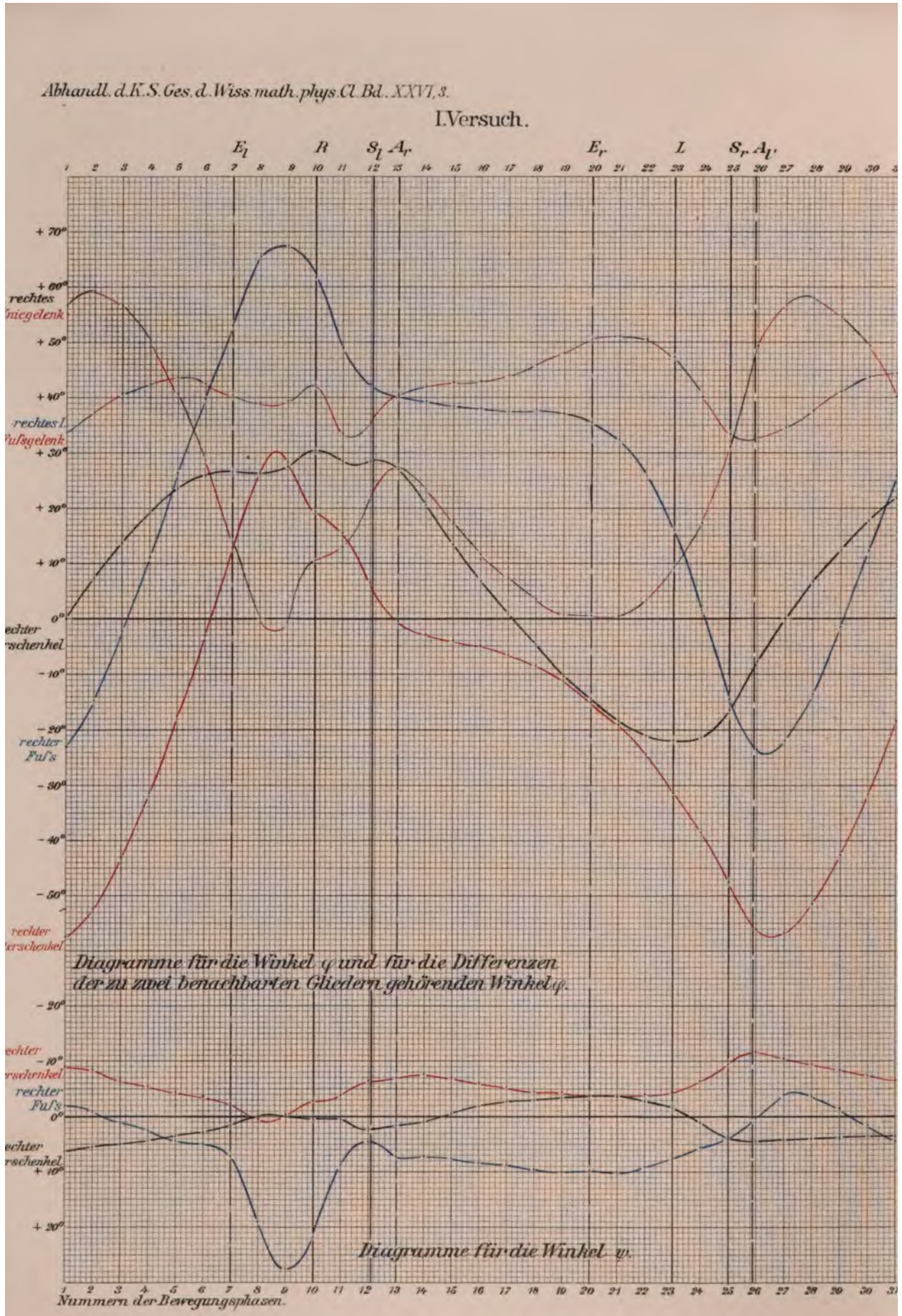
Bewegung des rechten Fußes während der Periode des Aufstehens. (Projection auf die Gangebene.)

Lith. Anst. v. F. A. Funke, Leipzig

III. Versuch (mit Gypsfuss).

Bewegung des rechten Fusses während der Periode des Aufstehens. (Projection auf die Gangebene.)

(natürliche Grösse).


I. Versuch.
E_l R S_l A_r E_r L S_r A_l
+ 70°
+ 60°
rechtes Kniegelenk
+ 50°
+ 40°
rechtes Fußgelenk
+ 30°
+ 20°
+ 10°
0°
rechter Unterschenkel
- 10°
- 20°
rechter Fuß
- 30°
- 40°
- 50°
rechter Oberschenkel
Diagramme für die Winkel φ und für die Differenzen der zu zwei benachbarten Gliedern gehörenden Winkel φ.
- 20°
rechter Unterschenkel
- 10°
rechter Fuß
0°
rechter Unterschenkel
+ 10°
+ 20°
Diagramme für die Winkel ψ.
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Nummern der Bewegungsphasen.

I. Versuch.

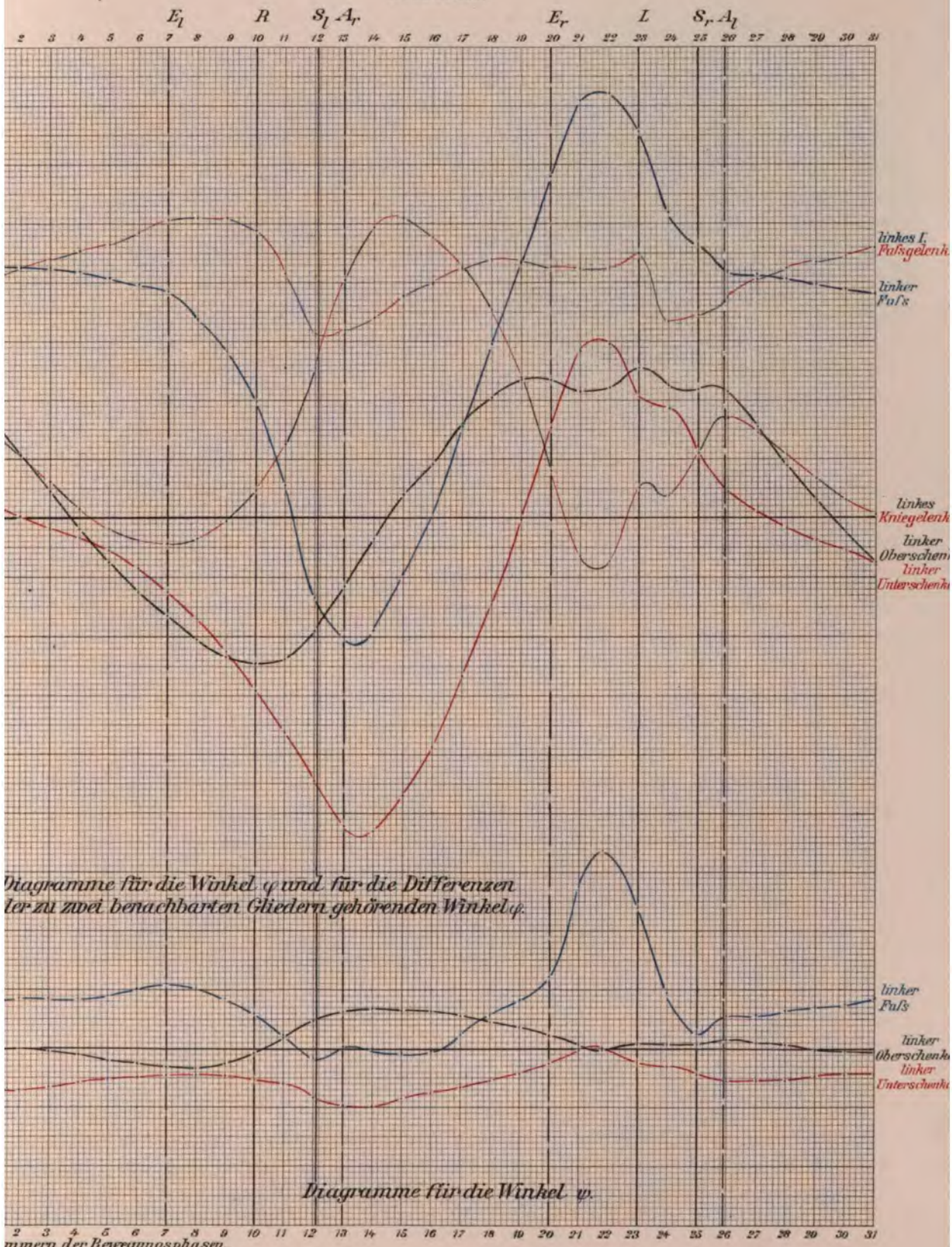
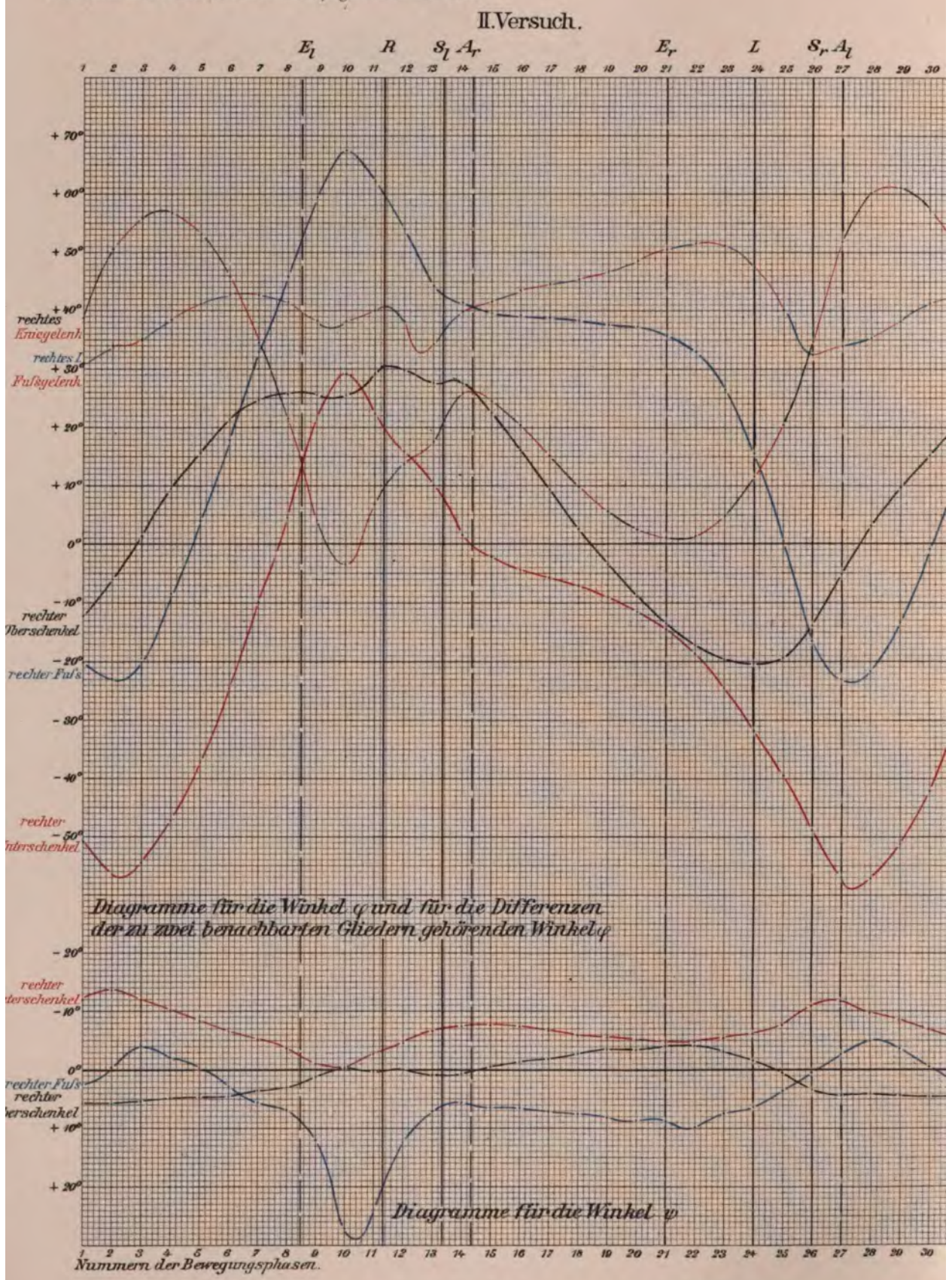


Diagramme für die Winkel φ und für die Differenzen der zu zwei benachbarten Gliedern gehörenden Winkel φ.

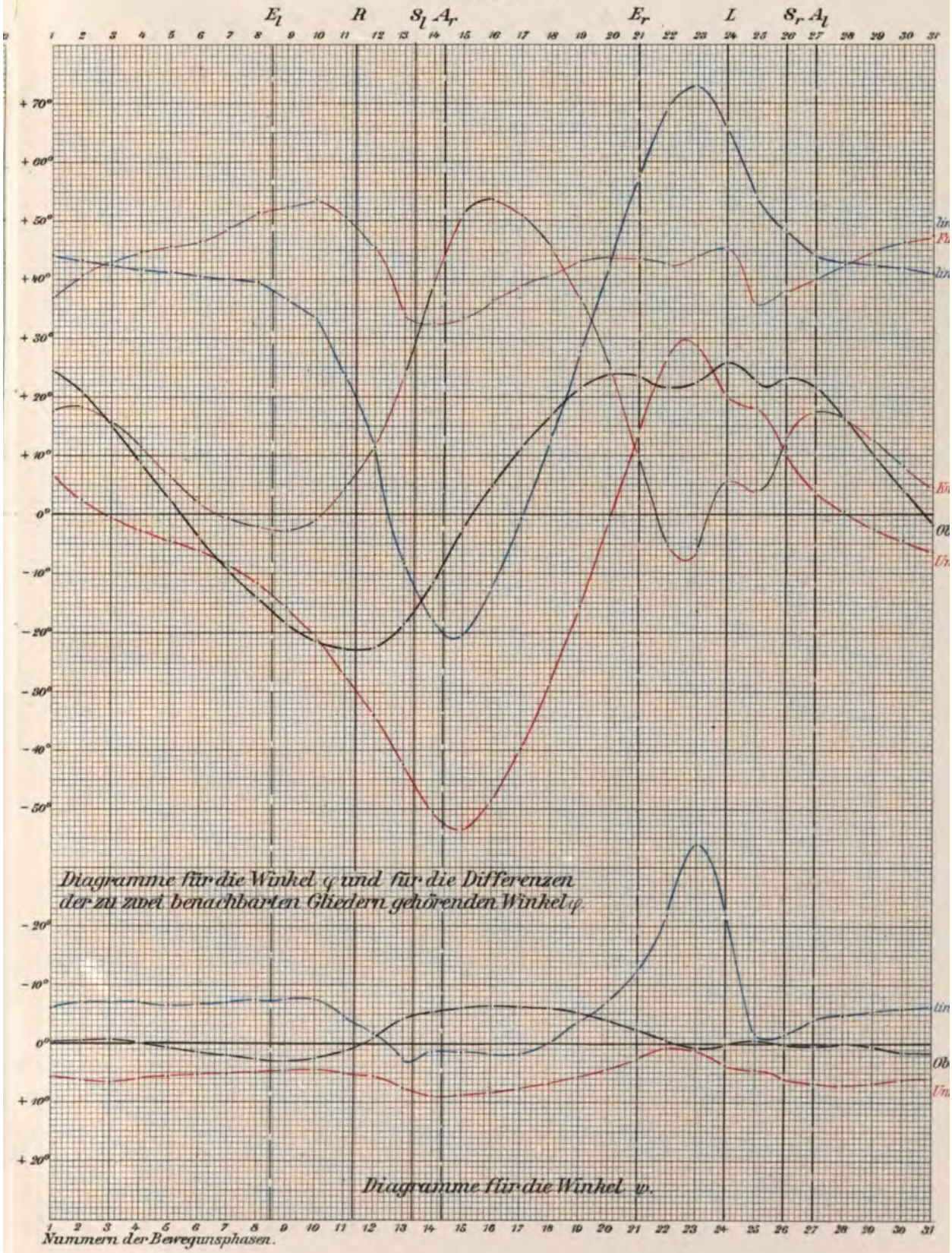
Diagramme für die Winkel ψ.

mmern der Bewegungsphasen.

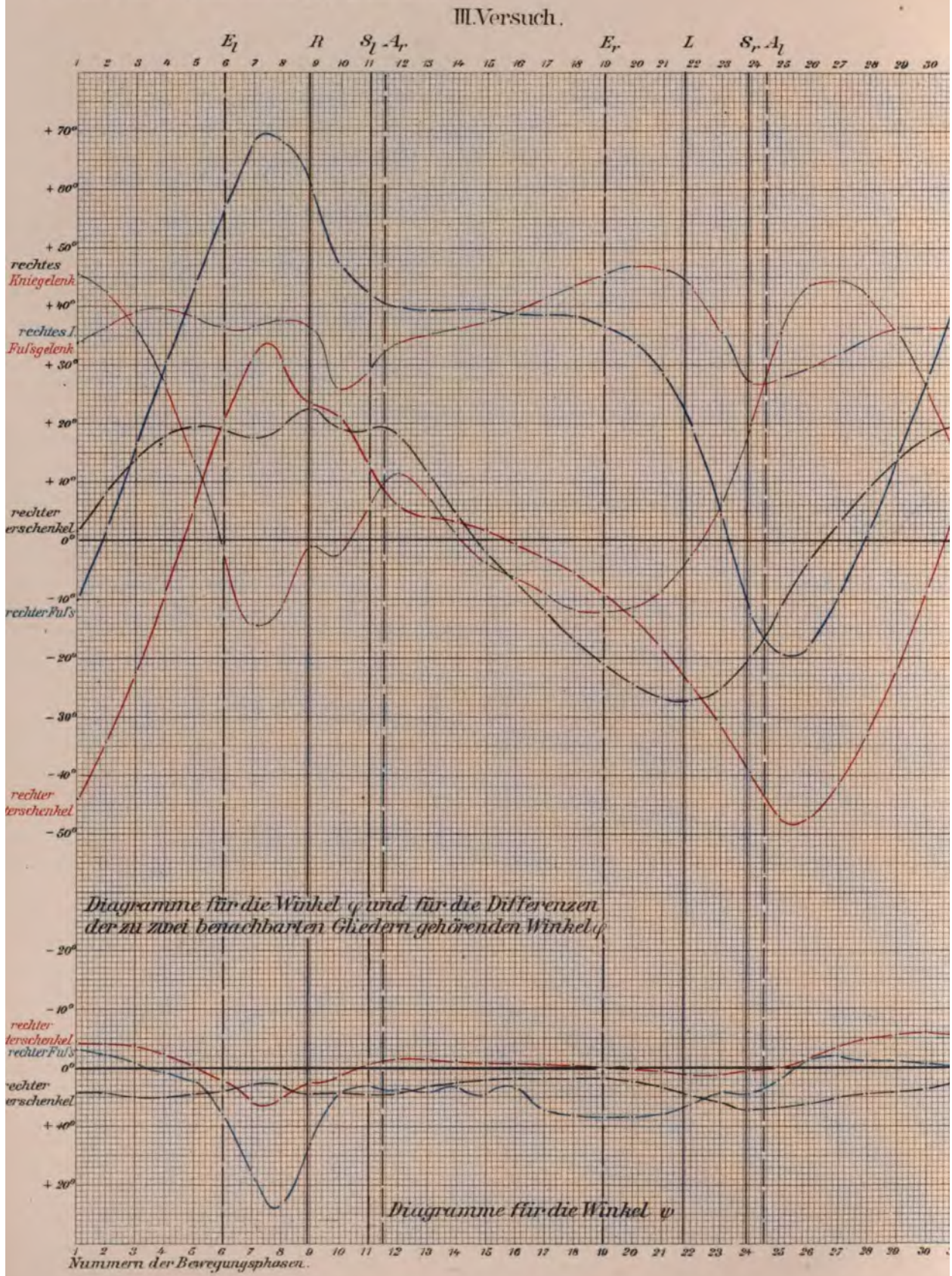
Lith. Anst. v. E. A. Funke, Leipzig.


II. Versuch.
E_l R S_l A_r E_r L S_r A_l
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
+ 70°
+ 60°
+ 50°
+ 40°
rechtes Kniegelenk
rechtes Fußgelenk
+ 30°
+ 20°
+ 10°
0°
- 10°
rechter Oberschenkel
- 20°
rechter Fuß
- 30°
- 40°
rechter Unterschenkel
- 50°
Diagramme für die Winkel φ und für die Differenzen der zu zwei benachbarten Gliedern gehörenden Winkel φ
- 20°
rechter Unterschenkel
- 10°
0°
rechter Fuß
rechter Oberschenkel
+ 10°
+ 20°
Diagramme für die Winkel ψ
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
Nummern der Bewegungsphasen.

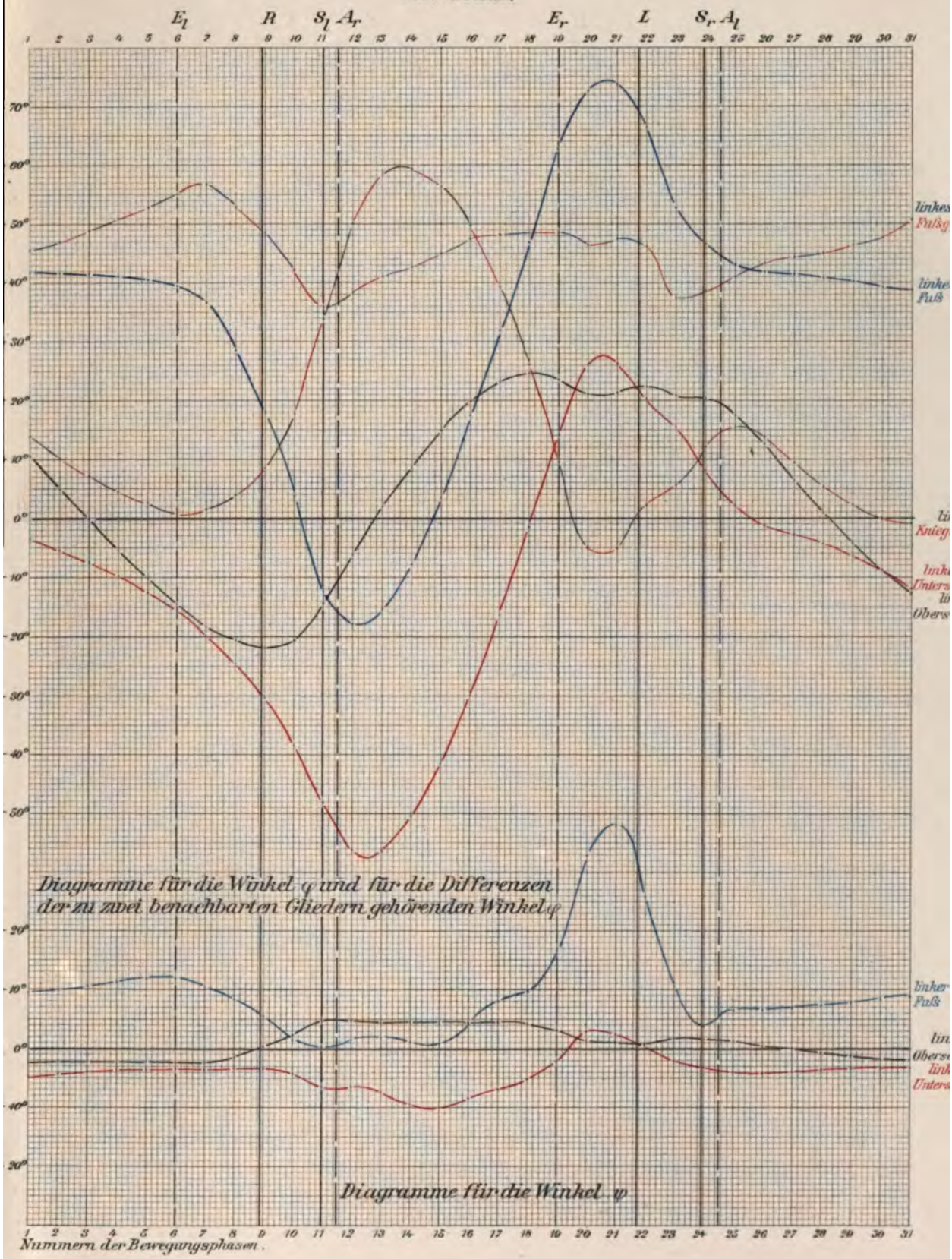
II. Versuch.



Lith. Anst. v. B. A. Funke, Leipzig.


III. Versuch.
E_l R S_l A_r E_r L S_r A_l
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
+ 70°
+ 60°
+ 50°
rechtes Kniegelenk
+ 40°
rechtes I. Fußgelenk
+ 30°
+ 20°
+ 10°
rechter Unterschenkel
0°
- 10°
rechter Fuß
- 20°
- 30°
- 40°
rechter Oberschenkel
- 50°
Diagramme für die Winkel φ und für die Differenzen der zu zwei benachbarten Gliedern gehörenden Winkel φ
- 20°
- 10°
rechter Oberschenkel
rechter Fuß
0°
rechter Unterschenkel
+ 40°
+ 20°
Diagramme für die Winkel ψ
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
Nummern der Bewegungsphasen.

III. Versuch.



Lith. Anst. v. E. A. Funke, Leipzig

LANE MEDICAL LIBRARY
STANFORD UNIVERSITY MEDICAL CENTER
STANFORD, CALIFORNIA 94305
FOR RENEWAL: PHONE 723-6691

DATE DUE

QP
310
W3F5
1900
LANE
STORAGE